

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

Диссертационная работа Н.М. Кащенко посвящена теоретическому исследованию и математическому моделированию процессов формирования неоднородной структуры F-области экваториальной ионосферы. Знание свойств неоднородностей ионосферы мелкого и среднего масштабов имеет важное значение для решения широкого круга прикладных задач радиосвязи и радионавигации, поскольку именно с наличием таких неоднородностей связаны, например, частые нарушения радиосвязи на трассах, проходящих через экваториальные широты. В свою очередь, формирование неоднородной структуры ионосферы и динамика изменения этой структуры в различных гелиогеофизических условиях является одной из ключевых проблем физики ионосферы, поскольку далеко не все закономерности и механизмы формирования такой структуры надежно установлены.

Цель работы заключается в исследовании роли неустойчивости Рэлея-Тейлора как основного механизма образования мелко- и среднemasштабных неоднородностей в ионосферной плазме низких широт. В классической гидродинамике неустойчивость Рэлея-Тейлора проявляется как неустойчивость тяжелой жидкости, расположенной над легкой при наличии силы тяжести. Аналогичная ситуация возникает в приэкваториальной ионосфере, где геомагнитные силовые линии практически горизонтальны, что, в результате замагниченности заряженных частиц, приводит к формированию горизонтально слоистой структуры плазмы, плотность которой резко увеличивается с высотой. Вследствие неустойчивости такой конфигурации малые возмущения магнитного поля или параметров плазмы вызывают перестановку плазменных трубок с низкой и повышенной плотностью. В результате возникает затравочный «пузырек» электронно-ионного газа, который под действием электрического дрейфа поднимается из F-области во внешнюю ионосферу, увеличиваясь в размерах до сотен километров. Такой объект с низкой концентрацией плазмы получил название экваториального пузыря (ЭП) или бабла (equatorial bubble).

Математическое описание процессов образования и эволюции ЭП требует построения на основе уравнений магнитной гидродинамики и магнитостатики соответствующих моделей и развитие методов их решений. Ввиду сложности исходной системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных наиболее эффективным методом их решения является численное моделирование. Разработка и реализация численных схем для

исследования физики ЭП явилось более конкретной целью диссертационной работы Н.М. Кашенко. Следует отметить, что важным моментом создания численных моделей ионосферных процессов является также возможность изучения и прогнозирования на их основе последствий техногенных воздействий на околоземное космическое пространство. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнения по отмеченным выше причинам.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Создание комплекса численных моделей низкоширотной ионосферы, описывающих временные и пространственные вариации параметров экваториальной плазмы глобального и среднего масштабов возникающих при различных геофизических условиях и при техногенных воздействиях.
2. Исследование механизма генерации и процессов развития неустойчивости Рэлея-Тейлора на основе созданного комплекса численных моделей.
3. Исследование эффектов природных и техногенных воздействий на структуру экваториальной ионосферы в условиях благоприятных для развития неустойчивости Рэлея-Тейлора.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Во **введении** сформулирована актуальность исследования, приведены цель, научная новизна, практическая значимость работы, защищаемые положения, личный вклад автора и сведения об апробации работы.

Первая глава носит обзорный характер. В первой части главы представлены сведения о пространственной структуре низкоширотной ионосферы по экспериментальным данным. Во второй части изложены общепринятые представления о физических процессах и механизмах, ответственных за генерацию ионосферных неоднородностей среднего масштаба. Рассмотрены характерные значения параметров ионосферной плазмы и условия применимости различных подходов к ее описанию. Особое внимание уделено применению магнитогидродинамического описания, на основе которого получены представленные в диссертации результаты.

Замечания к данной главе. Так как неустойчивость Рэлея-Тейлора является центральным объектом исследования, то необходимо было, по моему мнению, посвятить отдельный раздел аналитическому описанию этого явления, выводу выражения для инкремента неустойчивости, его физической интерпретации и т.д. Для читателя был бы полезен краткий исторический обзор о роли и значении неустойчивостей этого класса в физике околоземного пространства и основных достижениях в их изучении.

Во **второй главе** приведено описание набора численных моделей ионосферы, включающего фоновую крупномасштабную модель ионосферы в интервале высот 90 – 3000 км (модель шарового слоя) и модели среднемасштабных неоднородностей в F области экваториальной ионосферы. Глава является ключевой, т.к. содержит материал, касающийся свойств основных модельных уравнений и описание численных алгоритмов для их решения. Глобальная модель шарового слоя реализует расчет концентраций и температур заряженных и нейтральных частиц согласованно с распределением электрического потенциала в динамослое верхней атмосферы. Для численного решения соответствующих уравнений был разработан специальный алгоритм расщепления (факторизации) пространственных дифференциальных операторов уравнений диффузии и теплопроводности, позволяющий применение одномерных схем бегущего счета. Не менее важной и интересной является и методика согласованного расчета трехмерной динамики развития неустойчивости Рэлея-Тейлора в плазме экваториальной ионосферы с учетом взаимодействия между нейтральными и заряженными частицами и самосогласованного потенциального электрического поля. Корректный учет в рамках численной модели процессов электродинамики и переноса заряженных частиц и энергии – это один из важных результатов данной работы.

Несмотря на то, что большая часть представленных результатов была получена относительно давно – в 80-х и начале 90-х годов, следует отметить, что развитие автором модели отражает результаты мирового развития вычислительных методов в физике плазмы и динамики жидкостей. Например, для решения нелинейных гиперболических систем был успешно применен, созданный относительно недавно, метод «кабаре», что повысило эффективность численной модели и говорит о перспективности дальнейшего развития всего комплекса моделей.

По данной главе диссертации имеются замечания:

1. Не дано четкое описание верхних граничных условий для модели шарового слоя, которые, как известно, должны отражать специфику связи ионосферы с вышележащими слоями околоземной плазмы на низких, средних и высоких широтах.

2. Из текста диссертации не ясно, каким образом учитывались в модели шарового слоя магнитосферные источники – электрическое поле конвекции, высыпания энергичных электронов, продольные токи, которые определяют структуру высокоширотной ионосферы.

3. На стр. 75-76 говорится об использовании прямой и обратной дифференциальных прогонок для решения основных уравнений переноса ионов вдоль магнитного поля. При этом сам метод «дифференциальной прогонки» и область его применения не описываются.

4. На стр. 94 формула для E_{α} не верна, т.к. строго на экваторе ее знаменатель обращается в нуль ($\sin I = 0$).

Третья глава посвящена изучению процесса развития неустойчивости Рэля-Тейлора при различных геофизических условиях и свойств экваториальных пузырей, формирующихся в результате развития неустойчивости на основе разработанных моделей. На основе двумерной модели исследован процесс образования грибообразной формы пузыря в плоскости геомагнитного экватора. Основное внимание уделено эффектам выноса ионов NO^+ на высоты внешней ионосферы и тепловой структуре плазмы внутри экваториальных пузырей. Показано, в частности, что температура ионов может достигать значений свыше 10^4 К при уменьшении плотности внутри пузырей в 100 раз. Высказано предположение, что причиной этого может быть джоулев нагрев ионов в результате диссипации поперечных токов, хотя это предположение требует дальнейшей проверки. На наш взгляд, важную роль должно играть и значительное уменьшение теплоемкости плазмы внутри разреженного пузыря. Интересные и новые результаты получены при исследовании динамики развития множественных пузырей. Установлено, что в результате нелинейного взаимодействия пузырей, находящихся в различных фазах развития, «выживает» лишь незначительное их количество.

Замечание. Согласно данным наблюдений и теоретических исследований, существуют наклонные экваториальные пузыри, у которых вершинная часть смещена к востоку относительно основания. Было показано, что причиной этого является увлечение плазмы в основании пузыря западным зональным нейтральным ветром. Это характерное свойство формы пузыря никак не обсуждается в контексте данной главы и возникает вопрос – способна ли модель воспроизвести его?

В **четвертой главе** представлены результаты анализа особенностей развития плазменных пузырей при наличии внешних воздействий на ионосферу со стороны внутренних гравитационных волн (ВГВ), выбросов плазмогасящих веществ (H_2, H_2O) и переменного электрического поля. Впервые выполнено согласованное моделирование процессов генерации ионосферных неоднородностей внутренними гравитационными волнами и установлено, что они способны инициализировать неустойчивость Рэля-Тейлора с последующим развитием плазменного пузыря. Показано, что этот механизм носит резонансный характер, при котором высотный интервал наибольших значений линейного инкремента неустойчивости Рэля-Тейлора должен быть не меньше длины волны ВГВ. Согласно результатам модельных расчетов, выбросы плазмогасящих соединений вблизи максимума F2-слоя могут привести к интенсификации эффектов экваториального F рассеяния.

Пятая глава посвящена исследованию эффектов переноса плазмы вдоль геомагнитных силовых линий (трехмерная задача) на формирование экваториальных пузырей. Результаты

моделирования показали, что амбиполярная диффузия вдоль силовых линий и величина педерсеновской проводимости динамо-области, определяемая интегральным содержанием электронов в магнитной трубке, играют значительную роль в процессе опустошения плазменных пузырей, т.к. усиливают отток плазмы от приэкваториальных областей, где образуются пузыри, к основаниям силовых трубок. На перенос ионосферной плазмы вдоль геомагнитных силовых линий существенное влияние оказывает увлечение плазмы меридиональным нейтральным ветром. Для количественного исследования возможных эффектов воздействия ветра было выполнено моделирование сценариев развития пузырей при различных вариантах задания меридионального нейтрального ветра. Установлено, что действие трансэкваториального ветра, возникающего в сезоны солнцестояния или во время сильных магнитных бурь, приводит к образованию широтной асимметрии формы пузырей относительно плоскости геомагнитного экватора.

В **заключении** суммированы основные результаты работы. Эти результаты в обобщенном виде, определяя новизну и значимость работы, сводятся к следующему:

1. Создан комплекс численных моделей ионосферы, способных воспроизводить образование и динамику неоднородностей ионосферы крупного и среднего масштабов с различной степенью точности.

2. Результаты исследований с помощью этих моделей, показали, что широкий круг явлений, наблюдаемых в низкоширотной ионосфере, непосредственно обусловлен действием неустойчивости Рэлея-Тейлора. Кроме того, эти исследования позволили установить механизмы или дать новую интерпретацию таких структурных образований и явлений в экваториальной плазме, как:

- всплывающие экваториальные пузыри с низким содержанием плазмы;
- возникновение неоднородностей плазмы в результате действия неустойчивости Рэлея-Тейлора, инициируемой прохождением внутренних гравитационных волн;
- образование грибовидной формы пузыря как универсального свойства экваториальных неоднородностей с пониженной плотностью;
- выноса ионов NO^+ во внешнюю ионосферу в результате развития неустойчивости Рэлея-Тейлора, приводящей к образованию всплывающего экваториального пузыря.

Важными являются и результаты предсказания теории, полученные на основе численного моделирования, в том числе:

- резкое повышение электронной и ионной температур до величин $\sim 10^4$ К при уменьшении содержания заряженных частиц внутри пузыря;
- возможность генерации плазменных пузырей при инъекции на высотах F области экваториальной ионосферы плазмогасящих веществ.

По стилю изложения материала и оформлению работы имеются замечания. По тексту диссертации несколько раз повторяется описание исходных физических уравнений, входящих коэффициентов и т.д., что необоснованно перегружает работу и затрудняет чтение. Ряд формул и выражений, например, для скоростей ионизации и нагрева (стр. 66-68) приведены без указания источников. На стр. 69 приведен способ пересчета величины R_{12} , смысл которой не описан. Большинство графики и рисунки представлены в малом формате, что затрудняет их восприятие. Встречаются графики без осевых подписей и пояснений.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, которая выполнена на высоком научном уровне. Выносимые на защиту положения, выводы и рекомендации являются новыми и научно обоснованными. Достоверность научных выводов и положений обеспечена физическим обоснованием исходных модельных уравнений, анализом методов численного решения этих уравнений; сопоставлением результатов расчетов с данными измерений.

Значимость для науки результатов диссертации определяется прежде всего тем, что они могут быть использованы при планировании и интерпретации космических экспериментов, для решения прикладных задач радиосвязи и космической навигации, в целях диагностики и прогноза состояния ионосферы, а также в учебных курсах по физике ионосферы и верхней атмосферы. Отдельные элементы разработанных моделей, включая численные методы решения уравнений модели, могут быть использованы в других численных моделях ионосферы с целью их дополнения и совершенствования.

Результаты диссертации рекомендуется использовать в работах по исследованию и прогнозу ионосферы в Институте динамики геосфер РАН, Институте земного магнетизма и ионосферы им. Н.В. Пушкова РАН, Институте прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Институте солнечно-земной физики СО РАН, Полярном геофизическом институте РАН, Институте космических исследований РАН и других организациях соответствующего профиля.

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, изложены в научных публикациях, включая 17 публикаций в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертация соответствует специальности 01.02.05 –механика жидкости, газа и плазмы. Автореферат верно отражает содержание диссертации.

ВЫВОДЫ. Диссертация Н.М. Кашенко удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям: она является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором

исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение, имеющее важное значение в физике околоземной плазмы – на комплексе разработанных численных моделей решена проблема формирования среднemasштабной структуры низкоширотной ионосферы под действием неустойчивости Рэля-Тейлора. Следовательно, Николай Михайлович Кащенко заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Заведующий лабораторией физики ионосферно-
магнитосферного взаимодействия ИСЗФ СО РАН
доктор физ.-мат. наук

25.02.2016.

А.В. Гацилин

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

Телефон: (3952) 56-45-80, e-mail: avt@iszf.irk.ru

Подпись А.В. Гацилина заверяю.

Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН

кандидат физ.-мат. наук



И.И. Салахутдинова