

ОТЗЫВ

официального оппонента Пилипенко Вячеслава Анатольевича
на диссертацию Мингалева Олега Викторовича
**«Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме
и численное моделирование тонких токовых слоев»**,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.03.03 — Физика Солнца

Диссертация посвящена получению исходных систем уравнений, лежащих в основе численного моделирования крупномасштабных и низкочастотных процессов в плазме ионосферы, магнитосферы и обтекающего ее солнечного ветра. Такие системы уравнений необходимы для создания адекватной глобальной самосогласованной численной модели динамических процессов в околоземной плазме с полностью самосогласованным описанием электромагнитных полей и потоков частиц. Эти задачи имеют важное прикладное значение, а их актуальность и фундаментальность для космической физики не подлежат сомнению.

Глобальное моделирование магнитосферы и ионосферы Земли необычайно мощно развивается во всем мире в течение последних десятилетий. Разработанные численные МГД модели магнитосферы достигли значительных успехов в воспроизведении крупномасштабной структуры магнитосферы на дневной стороне. Однако они имеют достаточно грубое разрешение по пространству и не воспроизводят важнейшие структуры магнитосферы с кинетическими механизмами образования, в частности, токовый слой хвоста и область ускорения авроральных электронов. Для адекватного моделирования магнитосферы необходимы гибридные численные модели с пространственным разрешением хотя бы на уровне максимального кинетического масштаба — локального гирорадиуса тепловых ионов. Существующие же численные модели ионосферы даже на уровне постановки задачи являются лишь частично самосогласованными. Поэтому в практических целях преимущественно используются эмпирические модели ионосферы.

Принципиальная теоретическая проблема, решение которой необходимо для построения моделей околоземной плазмы, состоит в корректном описании электрического поля в крупномасштабных низкочастотных процессах. Потенциальная часть электрического поля возникает за счет относительно малого разделения зарядов в областях пространственной неоднородности плазмы, а соленоидальная часть — за счет изменений магнитного поля во времени. В работе в качестве решения этой проблемы получена модификация системы уравнений Максвелла для описания низкочастотных полей в плазме. В полученной системе магнитное поле определяется из уравнений Гаусса и Ампера. Для нахождения потенциальной части электрического поля вместо уравнения Пуассона используется условие квазинейтральности и условие силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Таким образом, при формальном равенстве плотности заряда нулю, учитывается осредненное по плазменным колебаниям электрическое поле за счет малого разделения зарядов. Для нахождения соленоидальной части электрического поля из

уравнений Ампера и Фарадея получено векторное уравнение Пуассона, в правой части которого стоит частная производная по времени от плотности тока плазмы.

Полученную систему уравнений для полей необходимо замыкать уравнениями переноса плазмы. В работе приведена общая схема такого замыкания и показано, что оно при любых уравнениях переноса дает для нахождения полей систему эллиптического типа, которая не содержит частных производных по времени и определяет магнитное и электрическое поля в области моделирования в приближении мгновенного дальнего действия по пространственному распределению параметров плазмы и наложенным граничным условиям.

В диссертации рассматривается указанное выше замыкание полученной модификации системы уравнений Максвелла для шести вариантов системы уравнений переноса бесстолкновительной плазмы. В первом варианте рассматривается самый общий случай, когда системой уравнений переноса является система кинетических уравнений Власова для каждой компоненты. Во втором рассматривается случай незамагниченных ионов и замагниченных электронов, которые описываются уравнением Власова в дрейфовом приближении. В третьем варианте все компоненты плазмы замагничены и описываются кинетическими уравнениями в дрейфовом приближении. В четвертом рассматривается случай, когда электроны и часть ионных компонент замагничены, но имеется хотя бы одна незамагниченная ионная компонента. В пятом рассматривается случай полностью замагниченной плазмы, для которой системой уравнений переноса являются система уравнений многокомпонентной газовой динамики. В шестом варианте рассматривается случай гибридного описания плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов, когда система уравнений переноса состоит из уравнений Власова для каждой ионной компоненты и двух гидродинамических уравнений для продольного и поперечного давления электронов. Для каждой из полученных систем уравнений рассматриваются основные шаги схемы численного интегрирования по времени. Полученные результаты создают необходимые теоретические основы для разработки глобальной численной модели околоземной плазмы с физически корректным описанием крупномасштабного распределения электромагнитного поля и частиц. Помимо этого, полученные результаты могут быть применены при изучении низкочастотных волн в плазме, в которых возникает продольное электрическое поле.

Вторая часть диссертации посвящена применению одной из выведенных систем уравнений – кинетической системы уравнений для плазмы из незамагниченных протонов и замагниченных электронов к численному моделированию стационарных тонких токовых слоев с заданной нормальной компонентой магнитного поля. Токовые слои такого типа играют важную роль в физике космической плазмы. В диссертации значительно усовершенствована теория одномерного токового слоя в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов, в котором магнитное поле имеет две самосогласованные компоненты и заданную нормальную компоненту. Улучшенная версия теории допускает несимметричные конфигурации, а также поток плазмы через слой.

При помощи этой теории создана численная модель, в которой образующие токовый слой немагнитные протоны описываются уравнением Власова. Предполагается, что электроны имеют функцию распределения Максвелла-Больцмана, которая для уравнения Власова в дрейфовом приближении является одним из точных решений. Это позволяет аналитически учесть вклад электронов в плотность тока и электрическое поле. Для численного решения уравнения Власова для протонов используется новый метод, в котором функция распределения рассчитывается методом характеристик. Это метод позволяет выполнять основной объем вычислений на графических процессорах, что дало возможность произвести моделирование на персональном компьютере с мощным графическим процессором. В случае использования метода частиц для таких расчетов был бы необходим мощный кластерный суперкомпьютер.

В результате моделирования получен набор симметричных конфигураций тонкого токового слоя при различных значениях входных параметров, для которых с хорошей точностью выполнены условия силового баланса. Получена функция распределения протонов с высоким разрешением в пространстве скоростей. Изучено влияние на токовый слой анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости потоков протонов.

В результате моделирования получены и исследованы конфигурации тонкого токового слоя, в которых величины магнитного поля и концентрации близки к постоянным, а сдвиговая компонента магнитного поля имеет профиль в форме колокола. Конфигурации такого типа встречаются при измерениях на космических аппаратах в хвосте магнитосфер Земли и Юпитера, на магнитопаузе, и в солнечном ветре. Такие конфигурации впервые удалось смоделировать автору диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения, заключения и списка литературы из 201 наименования. Она содержит 210 страниц, включая 22 рисунка.

Во **введении** дается обоснование актуальности темы диссертации, излагаются цели работы, обсуждается научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также дается краткое изложение содержания работы.

В **главе I** излагается вывод модифицированной системы уравнений для описания полей в плазме в приближении квазинейтральности, рассматривается схема замыкания системы различными видами уравнений переноса плазмы. Разработанная схема применяется для случая, когда уравнениями переноса являются уравнения Власова для каждой компоненты. Обоснована схема численного интегрирования по времени полученной в результате замыкания системы уравнений.

Глава II посвящена анализу уравнений Власова в случае наличия замагниченных компонент плазмы. Рассматриваются условия замагниченности и вытекающие из них следствия для околоземной плазмы. Рассматривается уравнение Власова в дрейфовом приближении, и вклад замагниченной компоненты в обобщенный закон Ома. Проведено замыкание полученной в главе I модифицированной системы уравнений для полей в приближении квазинейтральности для трех возможных вариантов уравнений переноса с замагниченными электронами и разным количеством замагниченных ионных компонент.

В главе III рассматривается МГД и гибридное описание плазмы с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов выводится дивергентная форма уравнения силового баланса, в которой исключено электрическое поле. Приводятся оценки, которые показывают нарушение в плазме солнечного ветра и магнитосферы Земли основных предположений, на которых основано приближение одножидкостной МГД. Выведена система уравнений многокомпонентной МГД для замагниченной плазмы с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Дан вывод гибридного описания плазмы, при котором незамагниченные ионы описываются уравнениями Власова, а замагниченные электроны описываются уравнениями газовой динамики. Для каждой из полученных систем уравнений рассматриваются основные детали схемы численного интегрирования по времени.

Глава IV посвящена использованию одной из выведенных в главе II систем уравнений для усовершенствования теории двумерного токового слоя в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов, в котором магнитное поле ортогонально току и имеет ненулевую нормальную компоненту. Получено представление функции распределения ведущих центров электронов как функции от трех независимых интегралов уравнений движения. Выявлена важная роль захваченных электронов в случае, когда магнитное поле в центре слоя меньше, чем на его границах. Показано, что в этом случае популяция захваченных электронов обязательно присутствует, обеспечивает квазинейтральность и является входным параметром модели. В конце главы выводится система уравнений для случая, когда функция распределения ведущих центров электронов является распределением Максвелла-Больцмана.

В главе V рассматривается численная модель одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов, в котором магнитное поле имеет две самосогласованные и заданную постоянную нормальную компоненты. Приводятся результаты моделирования как для случая симметричного токового слоя с одной самосогласованной компонентой магнитного поля, так и при наличии сдвиговой компоненты магнитного поля. Описаны два типа полученных решений: симметричные конфигурации и конфигурации с профилем сдвиговой компоненты магнитного поля в форме колокола.

В приложении дается описание двух новых методов численного решения стационарного уравнения Власова.

В заключении приводятся формулировки результатов диссертационной работы, а также результатов, которые выносятся на защиту.

В качестве замечаний и предложений по развитию изучаемого в диссертации направления, выскажу следующее общее пожелание. Во многих случаях, автор глубоко рассматривает принципиальные вопросы вывода исходных уравнений, находит и корректирует сомнительные места классических уравнений. Однако вопрос о том, к каким последствиям и физическим эффектам может привести предложенная им коррекция, не рассматривается. Например, напрашивается исследование вопроса, как полученные в

диссертации системы уравнений модифицируют теорию МГД волновых процессов, в частности, кинетических альвеновских волн. В общем, проделанная работа содержит очень большой теоретический и интеллектуальный потенциал, который пока реализован лишь в небольшой степени.

В целом, диссертация О.В. Мингалева имеет актуальную тематику, а полученные в ней результаты вполне обоснованы и имеют несомненную научную новизну. Она демонстрирует высокую научную квалификацию ее автора и является результатом его многолетней научной работы. Диссертация написана на хорошем профессиональном уровне. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации изложены в 21 опубликованной статье в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, которые входят в список ВАК. Результаты работы докладывались и обсуждались на всех крупных отечественных конференциях: "Физика плазмы в солнечной системе", «Физика авроральных явлений», и др.

По актуальности темы, научной новизне, практической значимости, а также достоверности и обоснованности результатов и выводов диссертация Мингалева Олега Викторовича представляет собой фундаментальное научное исследование и удовлетворяет всем требованиям, которые ВАК предъявляет к докторским диссертациям, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией физики околоземного пространства
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Пилипенко Вячеслав Анатольевич

«Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку».

Пилипенко Вячеслав Анатольевич

09.06.2020

Подпись В.А. Пилипенко заверяю



Ученый секретарь Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
к.ф.-м.н. Лиходеев Дмитрий Владимирович

Почтовый адрес: 125242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1,
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
телефон: +7 (903) 618-4666, E-mail: pilipenko_va@mail.ru