

## 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 численному моделированию тонких токовых слоев в хвосте магнитосферы Земли, а также получению систем уравнений, которые позволяют создавать оптимальные с точки зрения вычислительных ресурсов численные модели крупномасштабных и низкочастотных процессов в плазме ионосферы, магнитосферы и обтекающего ее солнечного ветра. Такие системы уравнений необходимы для создания адекватной численной модели динамических процессов в околоземной плазме с 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 околоземного пространства 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 ночной 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 малого разделения зарядов в областях пространственной неоднородности плазмы, а соленоидальная часть — за счет изменений магнитного поля во времени. В работе предложено решение этой проблемы для широкого круга актуальных задач, в которые входит токовый слой с нормальной компонентой магнитного поля.

В качестве решения проблемы получена модификация системы уравнений Максвелла для описания низкочастотных полей в плазме. В полученной системе магнитное поле определяется из уравнений Гаусса и Ампера, а 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 замыкание полученной модификации системы Максвелла для четырех вариантов уравнений переноса бесстолкновительной плазмы, которые могут использоваться для моделирования токовых слоев с нормальной компонентой магнитного поля. В первом варианте рассматривается самый общий случай, когда уравнениями переноса является система кинетических уравнений Власова для каждой компоненты. Во втором рассматривается случай немагнитных ионов и замагнитных электронов, которые описываются уравнением Власова в дрейфовом приближении. В третьем варианте все компоненты плазмы замагнитены и описываются кинетическими уравнениями в дрейфовом приближении. В четвертом рассматривается случай, когда электроны и часть ионных компонент замагнитены, но имеется хотя бы одна немагнитная ионная компонента. Полученные результаты создают необходимые теоретические основы для разработки экономичной численной модели токового слоя 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.

В работе одна из выведенных систем уравнений – кинетическая система уравнений для плазмы из немагнитных ионов и замагнитных электронов, применена 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 кинетическая модель стационарного пространственно одномерного токового слоя в бесстолкновительной плазме, в котором магнитное поле имеет две самосогласованные

компоненты и заданную нормальную компоненту. Улучшенная версия модели допускает несимметричные конфигурации, а также поток плазмы через слой.

В построенной в работе модели образующие токовый слой незамагниченные ионные компоненты описываются уравнениями Власова. Для численного решения этих уравнений используется новый метод, в котором функция распределения рассчитывается методом характеристик. Этот 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 для различных значений входных параметров получен большой набор симметричных конфигураций токового слоя, для которых с хорошей точностью выполнены условия силового баланса. Рассмотрены три возможных варианта. В первом токовый слой образован только продольными потоками протонов. Во втором он образован продольными потоками ионов кислорода ионосферного происхождения. В третьем варианте имеются как потоки протонов, так и ионов кислорода. Получены функции распределения ионов с высоким разрешением в пространстве скоростей и изучено влияние на токовый слой гидродинамической скорости ионов и их температуры, а также анизотропии давления электронов.

Из результатов моделирования получен полезный для интерпретации экспериментальных данных вывод о граничных значениях  $\geq 200$  км/с продольной скорости потоков протонов и ионов кислорода, достаточных для образования тонкого токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы. Также важным является вывод о том, что этот токовый может быть образован одними потоками ионов кислорода из ионосферы, когда протоны являются фоновой популяцией.

В результате моделирования в работе также получены и исследованы конфигурации 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. Такие конфигурации впервые удалось смоделировать автору диссертации.

В качестве замечаний и предложений по развитию изучаемого в диссертации направления, выскажу следующее общее пожелание. Автор глубоко рассматривает принципиальные вопросы вывода системы уравнений, оптимальной для моделирования крупномасштабных низкочастотных процессов. Однако вопрос о том, к каким последствиям и физическим эффектам может привести предложенная им коррекция, зачастую не рассматривается. Например, напрашивается исследование вопроса, как полученные в диссертации системы уравнений модифицируют стандартную 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 24 опубликованных статьях в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, которые входят в список ВАК. Результаты работы докладывались и обсуждались на всех крупных отечественных конференциях, таких как "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

06.06.2022  
«Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку».

  
Пилипенко Вячеслав Анатольевич

Подпись В.А. Пилипенко заверяю.



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

Почтовый адрес: 123242, г. 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