

ОТЗЫВ

официального оппонента Кочаровского Владимира Владиленовича

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

Диссертационная работа посвящена получению ряда приближённых систем уравнений для эффективного моделирования крупномасштабных медленных процессов в магнитоактивной неравновесной плазме и численному моделированию токовых слоёв на основе полученных уравнений. Рассмотренные в диссертации задачи являются весьма фундаментальными, актуальными и практически важными, в частности, для исследования свойств плазмы ионосферы и магнитосферы Земли и солнечного ветра. Разработанные в диссертации численные методы и полученные на их основе результаты представляются полезными для создания глобальной численной модели как магнитосферы Земли, так и её ионосферы, допуская адекватное самосогласованное описание электрического и магнитного полей. До сих пор в России и за рубежом используются лишь частично согласованные, эмпирические модели магнитосферы и ионосферы.

В первой части диссертации автору удалось предложить и развить оригинальное описание электрического поля в крупномасштабных низкочастотных процессах в магнитоактивной плазме, надлежащим образом разделив электрическое поле на соленоидальную и потенциальную части. В полученной в результате модифицированной системе уравнений Максвелла, целью которой является расчет низкочастотных полей в плазме, для нахождения потенциальной части электрического поля вместо уравнения Пуассона используется условие квазинейтральности и условие силового равновесия электронов вдоль линий магнитного поля. При этом удаётся приближённо учесть осредненное по плазменным колебаниям электрическое поле, возникающее за счет относительно очень малого разделения заряда. В свою очередь, соленоидальная часть электрического поля, получаемая на основе уравнений Ампера и Фарадея, описывается векторным уравнением Пуассона, правая часть которого содержит частную производную по времени от плотности тока плазмы.

В качестве материальных уравнений, замыкающих преобразованную систему уравнений Максвелла, в диссертации рассмотрены четыре варианта системы уравнений для токов и зарядов, т.е. так называемых систем уравнений переноса плазмы:

- 1) кинетическое описание немагнитной плазмы, когда системой уравнений переноса является система уравнений Власова для каждой компоненты;
- 2) кинетическое описание в случае замагнитных электронов и немагнитных ионов, когда система уравнений переноса состоит из уравнений Власова для

ионных компонент и уравнения Власова в дрейфовом приближении для замагниченных электронов;

- 3) кинетическое описание в случае полностью замагниченной плазмы, когда системой уравнений переноса является система уравнений Власова в дрейфовом приближении для каждой компоненты;
- 4) кинетическое описание в случае замагниченных электронов и частично замагниченных ионных компонент, когда система уравнений переноса состоит из уравнений Власова для незамагниченных ионных компонент и уравнений Власова в дрейфовом приближении для замагниченных ионных компонент и электронов.

В результате процедуры замыкания для полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащих частных производных по времени и определяющих магнитное и электрическое поле в области моделирования в приближении мгновенного дальнего действия согласно пространственному распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям.

Полученные системы уравнений позволяют создавать численные модели медленной эволюции тонкого токового слоя с нормальной компонентой магнитного поля, в которых наряду с ионами удается физически корректно учесть как фоновые электроны, так и недавно обнаруженные продольные потоки электронов, создающие сверхтонкий электронный токовый слой, который вложен в более толстый ионный токовый слой.

Во второй части диссертации одна из выведенных систем уравнений – кинетическая система уравнений для плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов – применяется к численному моделированию стационарных тонких токовых слоев с заданной нормальной компонентой магнитного поля, нередко встречающихся в космической плазме, в частности, в хвосте магнитосферы Земли. Автору удалось развить теорию одномерного токового слоя, в котором допускаются две самосогласованные компоненты магнитного поля и одна заданная нормальная к плоскости токового слоя постоянная компонента, в бесстолкновительной плазме, состоящей из незамагниченных ионов, возможно нескольких сортов, и замагниченных электронов. Разработанная модель, допускающая несимметричные конфигурации и поток плазмы через слой, реализована в численной схеме, в которой образующие токовый слой незамагниченные ионы каждого сорта описываются соответствующим стационарным уравнением Власова, а электроны имеют функцию распределения Максвелла-Больцмана. При этом для численного решения стационарного уравнения Власова применён оригинальный метод характеристик для расчёта функции распределения протонов, позволяющий выполнять основной объем вычислений на графических процессорах.

Итогом проведённого моделирования стал представительный набор симметричных конфигураций тонкого токового слоя ближнего хвоста магнитосферы при различных значениях входных параметров модели в условиях приближённого выполнения силового баланса. При этом в узлах пространственной сетки рассчитывается также функция распределения рассматриваемых сортов ионов по скоростям. Результаты моделирования позволили оценить диапазон параметров встречных потоков ионов в плазменном слое,

при которых возможно образование тонкого токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы. Кроме того, исследовано влияние анизотропии давления электронов, а также гидродинамической скорости и температуры образующих токовый слой потоков ионов. Также моделирование показало, что возможно образование указанного токового слоя потоками ионов кислорода из ионосферы в условиях, при которых потоки протонов либо отсутствуют, либо переносят относительно небольшую часть полного тока через слой. Такие потоки ионов кислорода были обнаружены в геомагнитно возмущенных условиях, обусловленных последовательным происхождением нескольких суббурь одна за другой, а также во время магнитных бурь.

Кроме того, проведено моделирование конфигураций тонкого токового слоя при наличии сдвиговой компоненты магнитного поля, в том числе ее постоянной внешней части. Получено два типа конфигураций. Конфигурации первого типа по ширине токового слоя и профилям функции распределения по скоростям похожи на симметричные конфигурации. В конфигурациях второго типа токовый слой более широкий, величина магнитного поля и концентрация плазмы являются практически постоянными, а сдвиговая компонента магнитного поля имеет колоколообразный профиль. Этот вариант, впервые промоделированный автором, типичен для хвоста магнитосферы Земли, для ряда участков ее магнитопаузы, а также для солнечного ветра и хвоста магнитосферы Юпитера.

Таким образом, тема диссертации является актуальной, а полученные автором результаты вполне обоснованы и обладают научной новизной. Диссертация, имеющая 165 страниц машинописного текста и включающая 24 рисунка, состоит из введения, пяти глав, приложения, заключения и списка литературы (201 наименование).

Во **введении** обоснована актуальность темы, изложены цели работы, обсуждена её научная новизна, а также практическая ценность полученных результатов.

Глава I посвящена выводу модификации системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности, а также замыканию этой системы уравнений системой уравнений Власова.

Глава II посвящена системе уравнений Власова в случае наличия замагниченных компонент плазмы.

В главе III рассматривается численная модель стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме с замагниченными электронами, имеющими распределение Максвелла–Больцмана, который образован падающими вдоль силовых линий магнитного поля встречными потоками незамагниченных достаточно горячих ионов.

В главе IV рассматриваются результаты моделирования симметричных конфигураций тонкого токового слоя ближнего хвоста магнитосферы без сдвиговой компоненты магнитного поля. Сначала исследуются конфигурации, образованные только потоками протонов. Затем рассматриваются конфигурации, образованные только потоками ионов кислорода. Далее рассматривается случай, когда присутствуют потоки ионов обоих сортов. При этом давление электронов считается изотропным. В конце рассматриваются конфигурации с небольшой анизотропией давления замагниченных электронов.

В главе V рассматриваются результаты моделирования конфигураций тонкого токового слоя ближнего хвоста магнитосферы, в которых имеется сдвиговая компонента магнитного поля, а давление электронов изотропно.

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

Заключение содержит формулировку результатов диссертационной работы, а также изложение результатов, которые непосредственно выносятся на защиту.

Несмотря на значительный объём диссертации, автору не удалось включить в неё необходимое, на мой взгляд, последовательное изложение ряда вопросов, особенно касающихся обоснования тех или иных приближений, сделанных при выводе некоторых уравнений, или упрощений, использованных при решении этих уравнений. В этой связи к диссертации имеется ряд замечаний, основные из которых сводятся к следующим общим вопросам, оставленным без должного ответа и требующим не только формально-математического, но и качественно-физического разъяснения.

1) Как используемые в главах 1 - 3 локальные приближения квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, применяемые для замыкания системы уравнений «переноса плазмы» для токов и зарядов, т.е. для вывода тех или иных форм обобщенного закона Ома, модифицируют получающиеся в результате свойства пространственной дисперсии магнитоактивной плазмы, т.е. нелокальную зависимость её отклика на присутствующие в ней электромагнитные поля, или – в терминах фурье-преобразования – зависимость тензора диэлектрической проницаемости от волновых векторов различных электромагнитных возмущений?

2) Как и насколько используемое в главах 1 – 2 приближённое описание токов смещения изменяет фактическое низкочастотное излучение плазмы, в том числе связанное с наличием крупномасштабного распределения электрических зарядов?

3) В какой мере и какие неоднородные немаксвелловские распределения электронов и ионов по скоростям допускаются в токовых слоях, рассмотренных в главах 4 – 5, особенно с учётом возможной неустойчивости изучаемых стационарных конфигураций?

Наконец, в качестве важного элемента подтверждения значимости и справедливости предложенных приближённых подходов к решению рассматриваемых задач автору следовало бы проводить более систематическое сравнение этих подходов с аналогичными подходами других, особенно зарубежных, исследователей подобных задач. Сказанное относится и к сравнению полученных автором и известных форм обобщённого закона Ома, и к набору собственных низкочастотных волн магнитоактивной плазмы, получающемуся и известному в рассматриваемых приближениях, и к сравнению выясненных автором и известных особенностей влияния неоднородности плазмы и присутствующих в ней квазимагнитостатических полей на динамику и устойчивость плазменно-полевых образований.

Впрочем, высказанные замечания не изменяют в целом высокую оценку диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно развёрнуто представлены в статьях (всего 24 статьи), которые опубликованы в отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в

список ВАК. Эти результаты докладывались и обсуждались на всех ежегодных отечественных конференциях "Физика плазмы в солнечной системе" в 2006–2022 гг.

Диссертация О.В. Мингалева является профессиональным научным исследованием, содержит важные научные результаты по актуальной тематике, которой автор занимался в течение 20 лет, и свидетельствует о его высокой научной квалификации. Диссертация написана грамотно и логично, в хорошем научном стиле, хотя и конспективным местами.

С учётом актуальности разработанной темы научной работы, новизны и практической значимости полученных научных результатов, достоверности и обоснованности сделанных выводов можно констатировать, что диссертация О.В. Мингалева представляет собой научное исследование фундаментального характера и удовлетворяет всем требованиям, которые ВАК предъявляет к докторским диссертациям, а ее автор, Мингалев Олег Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, заведующий отделом
астрофизики и физики космической плазмы
Института прикладной физики РАН

10.06.2022

Кочаровский Владимир Владиленович

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

Кочаровский Владимир Владиленович

Подпись В.В. Кочаровского, являющегося
ученым секретарем Института прикладной
физики РАН, к.ф.-м.н.



Корюкин Игорь Валерьевич

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
05.27.03 – Квантовая электроника

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,
телефон: +7 (831) 416-48-94, E-mail: kochar@appl.sci-nnov.ru