

ОТЗЫВ

официального оппонента Кочаровского Владимира Владиленовича

на диссертацию Мингалёва 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 описания 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 плазмы и электрического и магнитного полей в ней. 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 для крупномасштабных низкочастотных процессах в магнитоактивной плазме, надлежащим образом разделив описание соленоидальной и потенциальной частей электрического поля. В получившейся модифицированной системе уравнений Максвелла, дающей приближённое описание 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 эффективно учесть осредненное по плазменным колебаниям электрическое поле, имеющееся в неоднородной плазме 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 материального уравнения, замыкающего преобразованную систему уравнений Максвелла, в диссертации рассмотрен ряд (шесть вариантов) приближённых уравнений для токов и зарядов, т.е. так называемых уравнений переноса плазмы, имеющих вид системы 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:

- 1) полностью кинетическое описание незамагниченной плазмы, когда системой уравнений переноса является система уравнений Власова для каждой компоненты;
- 2) кинетическое описание в случае замагниченных электронов и незамагниченных 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;
- 5) газодинамическое описание в случае полностью замагниченной плазмы;
- 6) гибридное описание плазмы в случае замагниченных электронов и незамагниченных ионов.

Для всех указанных систем уравнений разработаны основные элементы схем их численного интегрирования, в том числе с учётом генерации низкочастотных волн в плазме, связанных с потенциальным электрическим полем, направленным вдоль и согласованным с неоднородным магнитным полем.

Во второй части диссертации одна из выведенных систем уравнений – кинетическая система уравнений для плазмы из незамагниченных протонов 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 бесстолкновительной плазме, состоящей из незамагниченных протонов и замагниченных электронов и включающей две самосогласованные компоненты магнитного поля и одну заданную постоянную компоненту, нормальную к поверхности токового слоя. Разработанная модель, допускающая несимметричные конфигурации и поток плазмы через слой, реализована в численной схеме, в которой образующие токовый слой незамагниченные протоны описываются 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 по скоростям, позволяющий выполнять основной объём вычислений на графических процессорах.

Итогом проведённого моделирования стал набор симметричных конфигураций указанного тонкого токового слоя при различных значениях входных параметров модели

в условиях приближённого выполнения силового баланса. При этом указана также функция распределения протонов по скоростям и исследовано влияние анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости образующих токовый слой потоков протонов.

Кроме того, проведено моделирование конфигураций тонкого токового слоя, в которых 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 210 страниц машинописного текста и включающая 22 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.

Глава III посвящена газодинамическому и гибриднему описанию бесстолкновительной космической плазмы с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля.

В **главе IV** рассматривается применение одной из выведенных в главе II систем уравнений к построению для плазмы из незамагниченных протонов и замагниченных электронов модели стационарного пространственно двумерного токового слоя, в котором магнитное поле и электрическое поле ортогональны току и имеют ненулевую нормальную компоненту.

В **главе V** рассматривается численная модель стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме с заданной нормальной компонентой магнитного поля и замагниченными электронами (имеющими распределение Максвелла–Больцмана), который образован идущими вдоль силовых линий магнитного поля встречными потоками незамагниченных горячих протонов.

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

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

Несмотря на значительный объём, автору не удалось включить в диссертацию необходимое, на мой взгляд, последовательное изложение ряда вопросов, особенно касающихся обоснования и области применимости тех или иных приближений, сделанных при выводе новых 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) Меняют ли и на каких масштабах используемые в главах 1 - 3 локальные приближения квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, применяемые для замыкания 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 – 3 приближённое описание токов смещения изменяет фактическое низкочастотное излучение плазмы, в том числе связанное с наличием крупномасштабного распределения электрических зарядов?

3) На какие неоднородные немаксвелловские распределения электронов и ионов по скоростям можно распространить описание токовых слоев, рассмотренное 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 известных и полученных автором форм обобщённого закона Ома, и к набору собственных низкочастотных волн магнитоактивной плазмы, известному и получающемуся в рассматриваемых приближениях, и к сравнению известных и выясненных автором особенностей влияния неоднородности плазмы и присутствующих в ней квазимагнитоэстатических полей на динамику и устойчивость плазменно-полевых образований.

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

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно развёрнуто представлены в статьях (всего 21 статья), 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 2006–2020 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

 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 заведующего
ученой секретарь Института прикладной
физики РАН, к.ф.-м.н.



 Корякин Игорь Валерьевич

10.11.2020

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