

ОТЗЫВ

официального оппонента Сомова Бориса Всеволодовича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего отделом физики Солнца Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова 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

Основной темой диссертации является получение систем уравнений для описания низкочастотных процессов в околоземной космической плазме ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра, в которых ток смещения пренебрежимо мал, и которые имеют пространственный и временной масштабы на три и более порядка большие локального дебаевского расстояния электронов и их плазменного периода соответственно. Такие системы уравнений необходимо получить для построения приближенных к реальности глобальной численной модели ионосферы Земли с полностью самосогласованным описанием электрического и магнитного полей, а также глобальной самосогласованной численной модели магнитосферы Земли. Эти задачи являются актуальными и фундаментальными, а также имеют большое прикладное значение.

Хотя этим задачам за рубежом в течение последних десятилетий уделяется большое внимание международного научного сообщества, они не получили какого-либо приемлемого решения. В частности, в наиболее совершенных зарубежных глобальных численных моделях ионосферы магнитное поле считается заданным по эмпирической модели IGRF, соленоидальная часть электрического поля не учитывается совсем, а потенциальная часть электрического поля рассчитывается по упрощенной и не соответствующей реальным процессам методике.

Главной теоретической проблемой, которая решена в диссертации, является правильное описание электрического поля в указанных процессах. Потенциальная часть электрического поля возникает в областях пространственной неоднородности плазмы за счет относительно очень малого разделения заряда, а соленоидальная часть электрического поля определяется изменениями магнитного поля по времени в соответствии с уравнением Фарадея.

В качестве решения этой проблемы в работе получена модификация системы уравнений Максвелла для описания полей в плазме. В ней магнитное поле определяется уравнениями Гаусса и Ампера, потенциальная часть электрического поля вместо уравнения Пуассона определяется условием квазинейтральности и условием силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а для соленоидальной части электрического поля получено векторное уравнение Пуассона, в правой части которого стоит частная производная плотности тока плазмы по времени. Таким образом, при формальном равенстве плотности заряда нулю учитывается электрическое поле за счет относительно очень малого разделения заряда, осредненное по плазменным колебаниям вдоль линий магнитного поля.

Эта система уравнений аналогично системе уравнений Максвелла должна замыкаться системой уравнений переноса плазмы. В работе предложена схема такого замыкания и показано, что при любой системе уравнений переноса плазмы для определения полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащая частных производных по времени, которая определяет электромагнитное поле в области моделирования по текущему пространственному распределению гидродинамических параметров плазмы, а также по граничным условиям в приближении мгновенного дальнего действия.

Решение этой важной теоретической проблемы получено в результате обобщения и использования двух хорошо проверенных приемов. Первый состоит в замене уравнения Пуассона условием квазинейтральности и условием силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Этот прием является обобщением подхода, хорошо проверенного в частично самосогласованных локальных и глобальных численных моделях ионосферы. Второй прием состоит в получении для соленоидальной части электрического поля из уравнений Фарадея и Ампера векторного уравнения Пуассона, в правой части которого стоит частная производная плотности тока плазмы по времени. Она в процессе замыкания выражается через поля, а также гидродинамические переменные и их пространственные производные из обобщенного закона Ома. Этот прием является обобщением хорошо проверенного подхода, применяемого в численных моделях на основе системы уравнений Власова-Дарвина.

В работе в качестве примеров рассматривается замыкание полученной модификации системы уравнений Максвелла для шести вариантов системы уравнений переноса бесстолкновительной плазмы. Также рассматриваются основные детали методики численного интегрирования по времени полученных систем уравнений.

Полученные результаты позволяют разрабатывать приближенную к реальности глобальную численную модель ионосферы Земли с полностью самосогласованным описанием магнитного и электрического поля. Также полученные результаты создают возможности для разработки приближенной к реальности глобальной численной модели магнитосферы Земли с физически разумным описанием крупномасштабного распределения электромагнитного поля и плазмы. Кроме того, полученные результаты будут полезными при изучении низкочастотных плазменных волновых процессов, в которых возникает продольное электрическое поле.

Второй темой диссертации является применение 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. Такие токовые слои возникают на предварительной фазе суббури в ближнем и среднем хвосте магнитосферы Земли.

Разработана общая теория стационарного пространственно одномерного токового слоя в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов, в которой магнитное поле имеет две самосогласованные компоненты и постоянную нормальную. Главное достижение теории состоит в том, что она допускает несимметричные конфигурации, а также поток плазмы через слой.

На основе этой теории построена численная модель, в которой образующие токовый слой протоны описываются стационарным уравнением Власова, которое решается численно. Учитываются электростатические эффекты, и предполагается, что электроны имеют функцию распределения Максвелла-Больцмана в стационарном электромагнитном поле. Это позволяет учесть вклад электронов в плотность тока и в электрическое поле аналитически. Для численного решения стационарного уравнения Власова успешно применен новый метод, в котором рассчитывается функция распределения методом характеристик. Это позволило выполнить большой объем расчетов на персональном компьютере с мощным графическим процессором. В случае использования метода частиц для таких расчетов потребовался бы достаточно мощный кластерный суперкомпьютер.

Получен набор симметричных конфигураций указанного тонкого токового слоя при различных значениях входных параметров. Для этих конфигураций точно выполнены условия силового баланса, и впервые рассчитана функция распределения протонов с высоким разрешением в пространстве скоростей. Также исследовано влияние анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости образующих токовый слой потоков протонов, что позволяет улучшить интерпретацию данных измерений токовых слоев на космических аппаратах.

Впервые в численном моделировании получены и исследованы конфигурации указанного тонкого токового слоя с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией. Конфигурации такого типа встречаются в данных измерений на космических аппаратах в хвосте магнитосферы Земли и на некоторых участках ее магнитопаузы, а также в солнечном ветре и в хвосте магнитосферы Юпитера.

Таким образом, новизна результатов и актуальность диссертации не вызывает сомнений.

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

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также кратко изложено содержание работы.

Глава I посвящена выводу модификации системы уравнений Максвелла для полей в плазме в приближении квазинейтральности, изложению схемы замыкания полученной системы уравнений системой уравнений переноса плазмы, а также применению этой схемы в случае, когда системой уравнений переноса являются уравнения Власова для каждой компоненты. Также рассматривается схема численного интегрирования по времени полученной в результате замыкания системы уравнений.

Следует отметить, что в главе приводятся оценки, которые показывают, что для глобальных численных моделей магнитосферы на основе метода частиц для системы Власова-Максвелла с рядом традиционных модельных упрощений потенциальное электрическое поле завышено на несколько порядков. Это приводит к завышенной на несколько порядков скорости электрического дрейфа, а значит и к неправильной динамике плазмы, что делает численную модель нереалистичной.

В главе II рассматривается система уравнений Власова в случае наличия замагниченных компонент. Рассматриваются условия замагниченности и их следствия. Показано, что из замагниченности любой ионной компоненты околоземной плазмы вытекает замагниченность электронов, из которой, в свою очередь, следует пренебрежимая малость тока смещения, а также выполнение условий квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля.

Далее рассматривается уравнение Власова в дрейфовом приближении, а также вклад замагниченной компоненты в плотность тока и обобщенный закон Ома. Затем рассматривается система уравнений Власова с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля в случае плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов, а также рассматриваются основные детали схемы численного интегрирования по времени этой системы уравнений. Также рассматривается система уравнений Власова в дрейфовом приближении в случае полностью замагниченной плазмы. После этого изложена схема численного интегрирования по времени этой системы уравнений. В конце главы рассматривается система уравнений Власова в случае замагниченных электронов и частично замагниченных ионных компонент.

Глава III посвящена газодинамическому и гибриднему описанию космической плазмы с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов рассматривается вывод дивергентной формы уравнения силового баланса, в которой исключено электрическое поле. С учетом этого уравнения проводится анализ системы уравнений одножидкостной магнитной газовой динамики. Приведены оценки, которые показывают нарушение в плазме солнечного ветра и магнитосферы Земли основных предположений, на которых основан вывод этой системы уравнений.

Затем рассматривается вывод системы уравнений многокомпонентной магнитной газовой динамики для замагниченной плазмы с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а также рассматриваются основные детали схемы численного интегрирования по времени этой системы уравнений.

После этого рассматривается вывод системы уравнений гибридного описания плазмы, в которой незамагниченные ионы описываются уравнениями Власова, а замагниченные электроны описываются в рамках газовой динамики с учетом условия их силового равновесия вдоль магнитного поля и условия квазинейтральности, а также рассматриваются основные детали схемы численного интегрирования по времени этой системы уравнений.

В главе IV рассматривается применение одной из выведенных в **главе II** систем уравнений к построению модели стационарного пространственно двумерного токового слоя, в котором плазма состоит из незамагниченных протонов и замагниченных электронов, а магнитное поле ортогонально току и имеет ненулевую нормальную компоненту. Получен общий вид функции распределения ведущих центров замагниченных электронов в рассматриваемом токовом слое как функции от трех независимых интегралов системы уравнений движения ведущего центра. Также показано, что если в центре слоя величина магнитного поля меньше, чем на его границах, то обязательно присутствует популяция захваченных электронов, которая обеспечивает электронеutralность и является входным параметром модели.

В конце главы рассматривается система уравнений модели в случае, когда функция распределения электронов является распределением Максвелла-Больцмана в стационарном электромагнитном поле.

В главе V рассматривается численная модель стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме из немагнитных протонов и замагнитных электронов, в которой магнитное поле имеет две самосогласованные компоненты и постоянную нормальную. Изложены результаты моделирования рассматриваемого симметричного тонкого токового слоя без сдвиговой компоненты магнитного поля. После этого изложены результаты моделирования рассматриваемого тонкого токового слоя в случае наличия сдвиговой компоненты магнитного поля. Описаны два типа из числа полученных конфигураций: симметричные конфигурации и конфигурации с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией.

В приложении изложены два новых метода численного решения стационарного уравнения Власова.

В заключении сформулированы результаты диссертационной работы, а также результаты, которые выносятся на защиту.

К диссертации у меня имеются два замечания. Первое относится к разделу III.2 в главе III, и состоит в следующем. Уравнения силового баланса (III.5) и (III.7) можно вывести в самом общем случае, а не только для плазмы из протонов и замагнитных электронов. Для этого нужно использовать те же приемы, которые используются в работе. Линейная комбинация уравнений потока импульса в форме (I.19) для ионных компонент и для электронов с целью исключить электрическое поле при помощи условия квазинейтральности даст обобщение уравнения силового баланса в форме (III.5) для общего случая плазмы из нескольких ионных компонент и немагнитных электронов. Аналогичным образом, суммируя уравнения (I.22) можно получить обобщение уравнения (III.7).

Второе замечание относится к разделу V.4.2 в главе V. Желательно более детальное изложение вопроса решения системы уравнений (V.50) для определения самосогласованных компонент магнитного поля в токовом слое в общем случае анизотропных электронов, когда их ток нелинейно зависит от этих компонент, и нелинейно зависит от их производных. Там явно предполагается применение того же приема, который используется в случае, когда магнитное поле имеет только одну самосогласованную компоненту. В этом случае вытекающее из уравнения Ампера уравнение (V.31) в результате выражения производной от самосогласованной компоненты магнитного поля через остальные слагаемые преобразуется к форме (V.33), которая решается численно.

Диссертация написана на высоком профессиональном уровне живым и ясным языком, и содержит очень малое число опечаток.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 21 опубликованной статье в отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в список ВАК, а также докладывались и обсуждались на всех ежегодных отечественных конференциях "Физика плазмы в солнечной системе" в 2006–2020 гг.

Диссертация О.В. Мингалева актуальна по тематике, содержит очень важные научные результаты и свидетельствует о высокой научной квалификации ее автора. Она является результатом более чем 20 лет его научной работы.

По актуальности выбранной темы, научной новизне, практической значимости, достоверности и обоснованности результатов и выводов диссертация О.В. Мингалева является фундаментальным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор, Мингалев Олег Викторович, несомненно заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом физики Солнца Государственного астрономического
института имени П.К. Штернберга Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Контактные данные:

тел.: +7(495)939-16-44; e-mail: somov@sai.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 – «Теоретическая физика»

Адрес места работы:

119234, г. Москва, Университетский проспект, д. 13

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Тел.: +7(495)939-16-44; e-mail: somov@sai.msu.ru

07.10.2020

Подпись сотрудника ГАИШ МГУ

Б.В. Сомова заверяю:

**Директор ГАИШ МГУ
профессор**

К.А. Постнов