

Утверждаю:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт лазерной физики
Сибирского отделения
Российской академии наук,
член-корреспондент РАН
А. В. Тайченачев



ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
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

Главной темой диссертации О. В. Мингалева является получение систем уравнений, которые позволяют моделировать происходящие в околоземной космической плазме ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра крупномасштабные медленные процессы с пространственным разрешением на уровне гирорадиуса тепловых протонов. Второй темой диссертации является применение одной из выведенных в работе систем уравнений для численного моделирования стационарных тонких токовых слоев в хвосте магнитосферы Земли.

В околоземном космическом пространстве, которое включает ионосферу и магнитосферу в потоке солнечного ветра, генерируются сложные токовые структуры и крупномасштабное распределение электромагнитного поля. На фоне этого глобального самосогласованного распределения полей и плазмы протекают локальные и быстрые процессы.

Актуальность работы вызвана прикладной необходимостью создания достоверных и максимально приближенных к реальности численных моделей глобального состояния магнитосферы и ионосферы в зависимости от параметров солнечного ветра, которые должны дать интерпретацию данным измерений на космических аппаратах, а также позволять прогнозировать по этим данным динамические процессы космической погоды.

Следует отметить, что созданию глобальных численных моделей ионосферы и магнитосферы Земли за рубежом в течение последних десятилетий посвящено большое количество работ. Однако накопленные спутниковые измерения показывают, что эти модели не достигают достаточного уровня детализации и реалистичности для применения

в практических целях. В частности, наиболее совершенные зарубежные глобальные модели ионосферы являются лишь частично самосогласованными, упрощенными в описании физических величин и используют различные эмпирические методы.

Оценка содержания работы и ее завершенности. Одним из главных результатов работы является выделение основной теоретической проблемы, препятствующей созданию реалистичных самосогласованных глобальных численных моделей ионосферы и магнитосферы Земли. Показано, что в существующих моделях отсутствует корректное описание электрического поля в крупномасштабных плазменных процессах. Это связано с тем, что электрическое поле состоит из потенциальной и соленоидальной частей, которые обусловлены совершенно разными процессами. Потенциальная часть электрического поля возникает в областях пространственной неоднородности плазмы вдоль магнитного поля за счет относительно очень малого разделения заряда, а соленоидальная часть электрического поля определяется изменениями магнитного поля по времени согласно уравнению индукции Фарадея.

Главным теоретическим результатом, полученным в диссертации, является модификация системы уравнений Максвелла для полей в плазме таким образом, что принципиально меняется способ определения электромагнитных полей. Вместо уравнения в частных производных по времени решается система уравнений эллиптического типа с граничным условиям в приближении мгновенного дальнего действия. В частности, это позволяет рассчитать независимо потенциальную часть электрического поля разделения зарядов из условия квазинейтральности и условия силового равновесия электронов вдоль силовых линий магнитного поля, что является исключительно важным для рассмотрения и анализа процессов в ионосфере и хвосте магнитосферы Земли. В работе выведено замыкание полученной модификации системы уравнений Максвелла для шести вариантов уравнений переноса бесстолкновительной плазмы, которые наиболее актуальны для физики магнитосферы и солнечного ветра.

Вторая часть работы посвящена применению теоретических разработок для расчета токового слоя магнитосферы Земли и исследования его свойств. Такие тонкие токовые слои играют важную роль в физике магнитосферы и возникают на предварительной фазе суббури в ближнем и среднем хвосте Земли, поэтому результаты второй части работы представляют значительный интерес для интерпретации спутниковых измерений.

Диссертация содержит 210 страниц машинописного текста, включая 22 рисунка. Текст состоит из введения, пяти глав, приложения, заключения, а также списка литературы из 201 наименования. Автором сформулированы 7 основных результатов, которые выносятся на защиту.

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

В главе I ставится задача физически последовательного воспроизведения электростатических эффектов в рамках системы уравнений Власова-Максвелла. Далее выводятся модификации системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности и варианты замыкания этой системы набором уравнений переноса плазмы. Также рассматривается такое замыкание для случая, когда в качестве набора уравнений переноса берутся уравнения Власова для каждой компоненты плазмы.

В главе II рассматривается система уравнений Власова в случае наличия замагнитенных компонент, что характерно для многих областей околоземной плазмы.

Анализируются условия замагниченности и физические следствия этого, рассматривается уравнение Власова в дрейфовом приближении. На основе этого рассматривается система уравнений Власова в случае плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов, что также характерно для ряда важных областей околоземной плазмы. Описываются основные детали схемы численного интегрирования по времени для этой системы, что позволяет применить полученные теоретические модели. В качестве более простого случая также рассматривается система уравнений Власова в дрейфовом приближении в случае полностью замагниченной плазмы. В конце главы рассматривается промежуточная система уравнений Власова в случае замагниченных электронов и частично замагниченных ионов.

В Главе III рассматривается широко используемое в глобальных кодах магнитосферы газодинамическое и гибридное описание бесстолкновительной космической плазмы. Принципиальным элементом является учет силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Приводится анализ основных предположений, на которых базируется вывод системы уравнений одножидкостной магнитной газовой динамики, а также приводятся оценки, которые показывают их нарушение в плазме солнечного ветра и магнитосферы Земли.

Далее рассматривается вывод системы уравнений многокомпонентной магнитной газовой динамики для замагниченной плазмы с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Для применения выведенных уравнений в практическом моделировании изложены основные детали схемы численного интегрирования по времени.

На следующем шаге 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. Для применения данных уравнений в практическом моделировании изложены основные детали схемы численного интегрирования по времени.

Глава IV посвящена применению построенной теории для создания модели стационарного пространственно двумерного токового слоя, в котором магнитное поле ортогонально току и имеют ненулевую нормальную компоненту. Используется одна из рассмотренных в **главе II** систем из незамагниченных протонов и замагниченных электронов. Показано, что если в центре слоя величина магнитного поля меньше, чем на его границах, то обязательно присутствует популяция захваченных электронов.

В главе V рассматривается численная модель стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме с заданной нормальной компонентой магнитного поля и с замагниченными электронами, имеющими распределение Максвелла—Больцмана. Анализируются более сложные конфигурации магнитного поля - без сдвиговой и со сдвиговой компонентой. Описаны два типа из числа полученных конфигураций: симметричные конфигурации и конфигурации с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля.

В приложении изложены два новых метода численного решения стационарного уравнения Власова, что имеет практическую ценность для реализации в численных кодах.

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

Научная новизна. В работе впервые предложено решение теоретической проблемы важной для прикладного численного моделирования магнитосферы и ионосферы Земли.

Выведены шесть новых систем уравнений для описания бесстолкновительной плазмы и низкочастотных полей в приближении мгновенного дальнего действия для шести различных вариантов системы уравнений переноса плазмы. Выведенные системы уравнений позволяют разрабатывать численные самосогласованные кинетические модели крупномасштабных процессов в магнитосфере и в солнечном ветре с пространственным разрешением порядка теплового гирорадиуса протонов, в частности, глобальные модели магнитосферы для прогнозирования космической погоды. Также результаты работы позволяют разрабатывать численные модели вертикально неоднородной ионосферы, включая F и E слои, с самосогласованным описанием электрического и магнитного полей.

Применение одной из выведенных систем уравнений продемонстрировало возможности и преимущества нового подхода к моделированию плазменных процессов. Усовершенствована теория стационарных пространственно одномерных тонких токовых слоев с незамагниченными ионами, в которых имеется нормальная компонента магнитного поля. Получен ряд симметричных конфигураций тонкого токового слоя, для которых точно выполнены условия силового баланса. Исследовано влияние на конфигурацию слоя анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости плазмы. Впервые в численном моделировании тонких слоев получены и детально исследованы конфигурации с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля. Данные результаты имеют практическую ценность поскольку конфигурации рассмотренного типа наблюдаются в спутниковых измерениях в хвосте магнитосферы Земли и на разных участках магнитопаузы, а также в солнечном ветре и в хвосте магнитосферы Юпитера.

Полученные результаты моделирования токовых слоев подтверждают правильность и эффективность подхода с определением потенциальной части электрического поля из условия квазинейтральности и условия силового равновесия электронов вдоль линий магнитного поля. Новым и важным для реализации модели является разработка и демонстрация двух новых методов численного решения стационарного уравнения Власова, которые позволяют выполнять основной объем вычислений на графических процессорах.

У диссертации есть недостатки, которые необходимо отметить.

В целом, основной результат диссертационной работы имеет теоретический характер. Хотелось бы, чтобы в тексте были приведены примеры численной апробации выведенных уравнений в реалистичной постановке, сравнение с данными наблюдений. Также интерес представляет вопрос о том, какие вычислительные ресурсы необходимы для реализации обсуждаемых трехмерных расчетов. В диссертации не приведены примеры конкретных явлений и процессов в магнитосфере и ионосфере, где новый подход может иметь преимущество в их воспроизведении и интерпретации по сравнению с существующими кодами.

Хотя в диссертации автор рассматривает вопросы применимости модели к описанию таких важных процессов в хвосте магнитосферы Земли, как начало суббури, ускорение частиц, ионосферные высыпания, следовало бы более подробно рассмотреть возможности применения рассматриваемых моделей для описания и изучения структуры и динамики крупномасштабных токовых структур в магнитосфере Земли. Явно недостаточно освещены результаты, выполненные автором совместно с Институтом космических исследований РАН по исследованиям тонких токовых слоев в хвосте магнитосферы. Представляется, что данная диссертация является закономерным продолжением и

развитием этих исследований, поэтому четкое обоснование места и контекста работы является необходимым.

В автореферате не приведены иллюстративные материалы и математические формулы, которые бы позволили оценить в полной мере глубину проведенного теоретического анализа и практическую ценность работы. Также следовало более точно сформулировать первое защищаемое положение.

Есть также следующие замечания.

В главе I при оценке значений отношения дебаевского расстояния к характерному пространственному масштабу изменения полей в околоземной плазме желательнее было бы привести более конкретные величины для плазмы околоземного солнечного ветра, различных областей магнитосферы, а также для F и E слоев ионосферы.

В главе III уравнение силового баланса можно было получить в самом общем случае бесстолкновительной плазмы, а не только в частном случае плазмы из протонов и замагниченных электронов.

Однако эти недостатки и замечания не меняют общую положительную оценку работы.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений. Диссертация написана четким и ясным языком, хорошо структурирована, и содержит незначительное число опечаток.

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 21 опубликованной статье, входящих в список ВАК, включая 6 статей в высокорейтинговых зарубежных журналах, а также докладывались и обсуждались на ежегодных отечественных конференциях "Физика плазмы в солнечной системе" в 2006–2020 гг. Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации.

Диссертация О.В. Мингалева представляет собой законченное фундаментальное научное исследование по актуальной тематике, и может быть квалифицирована как новое научное достижение.

Диссертация О.В. Мингалева удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, которые установлены в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а ее автор, Мингалев Олег Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Отзыв составил заместитель директора ИФЛ СО РАН по научной работе, заведующий отделом лазерной плазмы, доктор физико-математических наук Шайхисламов И.Ф.
Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева 15Б,
тел. 3833308022, e-mail ildars@ngs.ru

д.ф.-м.н. Шайхисламов И.Ф.

Результаты диссертации заслушаны, отзыв утвержден на заседании семинара Института лазерной физики СО РАН (протокол №1 от 02.11.2020).

Руководитель семинара, научный руководитель ИЛФ СО РАН

академик РАН Багаев С.Н.