

На правах рукописи

Мингалев Олег Викторович

**ОПИСАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ
ПРОЦЕССОВ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ
КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ И
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ**

Специальность 01.03.03 — Физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Апатиты — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Полярном геофизическом институте

Официальные оппоненты:

Кочаровский Владимир Владиленович,
доктор физико-математических наук, член-корр. РАН,
Институт прикладной физики РАН, заведующий отделом

Пилипенко Вячеслав Анатольевич
доктор физико-математических наук,
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
заведующий лабораторией

Сомов Борис Всеволодович
доктор физико-математических наук,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, заведующий отделом

Ведущая организация:

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына

Защита диссертации состоится 21 мая 2020 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 при Институте космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических исследований РАН и на сайте
<http://www.iki.rssi.ru/diss/index.htm>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

О. Ю. Цупко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данная диссертационная работа посвящена выводу систем уравнений для описания крупномасштабных медленных процессов в околоземной космической плазме ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра, а также применению одной из выведенных систем уравнений к численному моделированию стационарных тонких токовых слоев в хвосте магнитосферы Земли.

Актуальность проблемы

В плазменной оболочке Земли, которая состоит из ионосферы, магнитосферы и обтекающего ее солнечного ветра, протекают взаимосогласованные сложные процессы в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Взаимодействие плазменной оболочки Земли с различными крупномасштабными неоднородными структурами в солнечном ветре регулярно приводит к развитию ее глобальных возмущений — магнитосферных бурь и суббурь, которые оказывают большое влияние на современную высокотехнологичную инфраструктуру. При этом и в ионосфере, и в магнитосфере, и в обтекающем магнитосферу солнечном ветре имеется относительно крупномасштабное и медленно изменяющееся сглаженное по быстрым мелкомасштабным процессам распределение электромагнитного поля и плазмы, которое определяется глобальной магнитосферно–ионосферной токовой системой.

Детальное изучение глобальной картины медленных крупномасштабных плазменных процессов, протекающих в ионосфере и в магнитосфере Земли, а также в обтекающем ее солнечном ветре, является одной из самых актуальных и фундаментальных задач физики околоземного космического пространства. Построение такой картины на основе только данных наземных и спутниковых измерений невозможно, во-первых, из-за больших размеров объекта изучения, сложности протекающих в нем процессов и большой изменчивости объекта в зависимости от внешних условий, а во-вторых, из-за локального характера измерений на космических аппаратах в пространстве и времени. Для интерпретации накопленного огромного объема данных измерений на космических ап-

паратах необходимо создание численных моделей, которые бы физически корректно воспроизводили основные детали указанных процессов.

Поэтому разработка численных моделей для различных крупномасштабных плазменных процессов в ионосфере и магнитосфере Земли является актуальной научной тематикой, которой начиная с 70-х годов прошлого века посвящено огромное число работ.

Однако в современной мировой науке численное моделирование указанных процессов в плазме околоземного космического пространства столкнулось с рядом теоретических проблем, главная из которых состоит в том, что до настоящего времени не была выведена система уравнений, которая бы правильно описывала рассматриваемые крупномасштабные плазменные процессы, и при этом допускала возможность корректного численного решения с физически разумным пространственным и временным разрешением при помощи имеющихся вычислительных ресурсов.

Описывающую плазму систему уравнений можно разделить на две тесно связанные между собой части: на систему уравнений переноса, которая описывает движение каждой компоненты плазмы, и на систему уравнений для полей.

Отметим, что во всех системах уравнений, применяемых для описания достаточно крупномасштабных медленных плазменных процессов, в уравнениях Максвелла отбрасывается ток смещения, что означает переход к мгновенному дальнему действию, в рамках которого пространственное распределение магнитного и электрического полей в области моделирования должно однозначно определяться текущим распределением гидродинамических параметров плазмы и граничными условиями из систем уравнений эллиптического типа, не содержащих частных производных по времени. Именно так происходит определение полей в успешно работающих моделях на основе системы уравнений Власова–Дарвина, которая получается из исходной системы Власова–Максвелла в результате отбрасывания соленоидальной части тока смещения, что соответствует исключению электромагнитного излучения.

Главной теоретической проблемой является правильное описание

электрического поля. Эта проблема разделяется на две. Первая состоит в правильном описании продольного электрического поля, которое появляется в областях неоднородности плазмы за счет относительно очень малого разделения зарядов и обеспечивает квазинейтральность плазмы, а также существенно влияет на ее движение. Вторая проблема состоит в правильном описании соленоидальной части электрического поля, которая согласно уравнению Фарадея определяется изменениями магнитного поля по времени.

Первым типом численных моделей, которые стали использовать для моделирования рассматриваемых плазменных процессов начиная с 70-х годов прошлого века, являются модели, основанные на численном решении различных вариантов системы уравнений одножидкостной магнитной газовой динамики — так называемые МГД-модели.

В этих системах уравнений указанное выше продольное электрическое поле за счет относительно очень малого разделения зарядов вообще не учитывается. Как будет показано в работе в разделе III.3 главы III, вывод системы уравнений одножидкостной МГД основан на следующих 4-х предположениях: плазма является замагниченной, электроны являются холодными по сравнению с протонами, то есть их давление много меньше протонного, электрическое поле считается ортогональным магнитному, и ортогональная часть скорости ионов считается равной скорости электрического дрейфа.

Анализ характерных масштабов крупномасштабных процессов в магнитосфере и в солнечном ветре приводит к выводу, что условия применимости МГД-подхода в магнитосфере и в солнечном ветре заведомо нарушаются, особенно сильно в наиболее важных областях с сильной пространственной неоднородностью — в различных токовых слоях.

Подстановка последних двух предположений в уравнение Фарадея приводит к уравнению индукции или вмороженности, которое относительно магнитного поля является эволюционным уравнением гиперболического типа, сама форма которого противоречит концепции мгновенного дальнего действия.

В результате в системе уравнений МГД правильное распределение

полного тока в плазме не рассчитывается, а для расчета магнитного поля вместо имеющих эллиптический тип уравнений Ампера и Гаусса используется эволюционное уравнение индукции – вмороженности, в котором в качестве коэффициента фигурирует неполная часть ортогональной составляющей скорости плазмы.

Такой подход является аналогом приближения невязкой акустики в газовой динамике, и может приближенно описывать только процессы в слабо неоднородной плазме. Поэтому МГД-подход приближенно описывает, в частности, начальные линейные стадии развития некоторых неустойчивостей, плазменные волны, но не воспроизводит наблюдаемые при их распространении более тонкие кинетические эффекты, и в принципе не позволяет правильно описать структуры и процессы в существенно неоднородной плазме, например, токовые слои.

Результаты использования глобальных МГД-моделей магнитосферы Земли за последние четыре десятилетия показывают, что такой подход в принципе не позволяет воспроизвести хотя бы на минимальном качественном уровне такие важнейшие особенности магнитосферы, как радиационные пояса, кольцевой ток и токовый слой хвоста.

Вторым типом моделей, которые также применяются для моделирования рассматриваемых крупномасштабных плазменных процессов в очень большом числе работ начиная с 70-х годов прошлого века, являются модели, в которых численно решаются различные варианты системы уравнений гибридного описания плазмы. В этих системах протоны описываются уравнением Власова, причем часто с добавлением модельной "силы трения с электронами", а замагниченные электроны описываются в рамках различных вариантов упрощенной газовой динамики. Чаще всего электроны считаются нейтрализующим безмассовым газом с постоянной температурой по пространству и времени. Электрическое поле определяется из условия силового равновесия электронов с учетом модельной "силы трения с протонами".

При этом все существующие варианты гибридных систем имеют аналогичный описанному выше для МГД-моделей принципиальный недостаток в определении магнитного поля через разностную аппроксима-

цию его частной производной по времени в уравнении Фарадея, что противоречит концепции мгновенного дальнего действия. Также в гибридных системах присутствуют чисто модельные эмпирические слагаемые.

Практика показала, что гибридные модели по сравнению с МГД-подходом дают более точное описание распространения плазменных волн в слабо неоднородной плазме, поскольку воспроизводят ряд недоступных МГД ионных кинетических эффектов. При этом гибридные глобальные модели магнитосферы по сравнению с МГД-моделями дают несколько более приближенные к реальности результаты, которые, однако, также не воспроизводят ключевые особенности магнитосферы.

Третьим типом моделей, которые используются для моделирования рассматриваемых крупномасштабных плазменных процессов также в очень большом числе работ начиная с конца 80-х годов прошлого века, являются модели, в которых методом частиц численно решаются кинетическая система уравнений Власова–Максвелла с тремя модельными упрощающими приемами, которые вызваны необходимостью снизить вычислительные затраты до приемлемого уровня, но полностью нарушают реалистичность модели.

В этих моделях скорость света занижается не менее чем на 2 порядка, используется очень малое среднее число модельных макрочастиц в дебаевской ячейке $\sim 10 - 50$, и рассматриваются модельные "тяжелые электроны", которые в 16–128 раз легче протонов, в то время как реальные электроны легче протонов в 1836 раз. Численные эксперименты показывают, что для минимально приемлемого уровня воспроизведения электростатических эффектов в самых совершенных неявных версиях метода крупных частиц необходимо использовать в расчетах порядка 100–1000 модельных электронов в дебаевской ячейке в пространственно одномерном случае, а в пространственно двумерном и трехмерном случаях требуется $\sim 10^4 - 10^5$ модельных частиц. При этом пространственное разрешение модели в самом грубом из допустимых вариантов должно быть примерно равным дебаевскому расстоянию электронов. Поэтому при изложенных упрощениях в численной модели крупномасштабных процессов очень хорошим уровнем относительного отклонения

от электронейтральности считается 10^{-1} , в то время как в реальности эта функция имеет порядок $10^{-8} - 10^{-6}$, то есть плотность заряда в численной модели завышена как минимум на 5 порядков. В результате в численной модели потенциальное электрическое поле, а значит и скорость электрического дрейфа, завышены на не меньшее число порядков. Это сильно искажает глобальную динамику как ионов, так и модельных "тяжелых электронов", и вносит искажение в распределение плотности тока, которое приводит к искажению магнитного поля, а также к искажению соленоидальной части электрического поля.

Также отметим, что замена реальных электронов на 1-2 порядка более тяжелыми "модельными электронами" существенно меняет свойства и поведение системы на качественном уровне. В результате такие модели лишь на отдаленном качественном уровне могут воспроизводить поведение реальной системы. Поэтому результаты расчетов по этим моделям всегда приводятся в безразмерном виде.

Из сказанного выше следует, что полная система уравнений Власова–Максвелла подходит только для численного моделирования локальных быстрых "излучательных" процессов с пространственным разрешением порядка дебаевского расстояния, которое в магнитосфере имеет характерные значения порядка сотни метров, и с временным разрешением порядка плазменного периода, который в магнитосфере имеет характерное значение $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$ секунды. Для реалистичного численного моделирования в области с размером в десятки радиусов Земли крупномасштабных медленно изменяющихся полей с пространственным масштабом изменения на 4 порядка большим характерного дебаевского расстояния и временным масштабом изменения на 5 порядков большим характерного плазменного периода эта система требует огромный объем вычислительных ресурсов, заведомо недоступный в обозримой перспективе.

По сравнению с плазменными колебаниями рассматриваемые крупномасштабные медленные процессы являются с высокой точностью стационарными. Поэтому для их физически корректного описания нужно вывести систему уравнений, которая получается в результате осредне-

ния системы уравнений Власова–Максвелла по плазменным колебаниям вдоль магнитного поля. При этом очевидным образом также будет исключено электромагнитное излучение, то есть совершен переход к безызлучательному приближению Дарвина. Поэтому та же система уравнений получится и в результате осреднения по плазменным колебаниям системы уравнений Власова–Дарвина.

Отметим, что результат осреднения по плазменным колебаниям вдоль магнитного поля известен с 70-х годов прошлого века и хорошо проверен на практике в численном моделировании ионосферных процессов при помощи частично самосогласованных моделей ионосферы. Он состоит в условии квазинейтральности и условии силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. В этом случае плазма формально в узлах сетки считается электронейтральной, а объемная плотность продольной силы, действующей на электроны со стороны усредненного по продольным плазменным колебаниям электрического поля, равна продольной компоненте дивергенции тензора давления электронов.

Также отметим, что условие продольного силового равновесия электронов с начала 2000-х годов успешно использовалось в численно-аналитических моделях стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя в хвосте магнитосферы.

Таким образом, для получения правильного описания полей в рассматриваемых крупномасштабных медленных плазменных процессах нужно выполнить выкладки, аналогичные таковым при выводе уравнений Дарвина для полей, в которых для определения потенциальной части электрического поля вместо уравнения Пуассона используются условие квазинейтральности и условие силового равновесия электронов вдоль магнитного поля.

Цели и задачи данной работы

Первой целью данной работы является вывод системы уравнений для электромагнитных полей в плазме в приближении квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а также схемы замыкания её системой уравнений переноса плазмы.

Вторая цель состоит в выводе системы уравнений для описания бес-

столкновительной плазмы в указанном приближении в результате замыкания системы уравнений для полей соответствующей системой уравнений переноса в следующих наиболее актуальных случаях:

- 1) 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.

Третья цель заключается в выводе для каждой из этих систем уравнений схем их численного интегрирования по времени, в которых условие квазинейтральности и условие силового равновесия электронов вдоль магнитного поля должны выполняться в численном виде.

Четвертая цель состоит в практической проверке предложенного в работе нового теоретического подхода на актуальной задаче моделирования стационарных тонких токовых слоев с заданной нормальной компонентой магнитного поля, в которых присутствуют сильные неоднородности как полей, так и гидродинамических параметров плазмы, и для которой имеется большой объем данных измерений на космических аппаратах.

Для достижения этой цели необходимо, во-первых, применить указанную выше вторую систему уравнений в случае плазмы из незамагниченных протонов, описываемых уравнением Власова, и замагниченных электронов, описываемых уравнением Власова в дрейфовом приближении, и построить законченную теорию для рассматриваемого класса тонких токовых слоев с полным учетом электростатических эффектов. Во-вторых, необходимо на основе этой теории разработать численную модель тонкого токового слоя. В-третьих, нужно получить при помощи модели достаточно большой набор стационарных конфигураций ТТС для различных входных параметров модели и на качественном уровне сравнить их поведение с данными измерений и результатами известных теоретических моделей.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи.

1. Вывести систему уравнений для полей из уравнений Максвелла, условия квазинейтральности и условия силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а также вывести схему её замыкания системой уравнений переноса плазмы.
2. Вывести систему уравнений для кинетического описания бесстолкновительной незамагниченной плазмы с учетом продольного силового равновесия электронов, которую можно назвать системой уравнений Власова в приближении квазинейтральности. Вывести схему численного интегрирования по времени полученной системы уравнений.
3. Вывести систему уравнений для кинетического описания бесстолкновительной плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов в приближении квазинейтральности, а также вывести схему численного интегрирования по времени этой системы уравнений.
4. Вывести систему уравнений для кинетического описания бесстолкновительной полностью замагниченной плазмы, а также вывести схему численного интегрирования по времени этой системы.
5. Вывести систему уравнений для кинетического описания бесстолк-

новительной плазмы из частично замагниченных ионов и замагниченных электронов, а также вывести схему численного интегрирования по времени полученной системы уравнений.

6. Вывести систему уравнений многокомпонентной магнитной газовой динамики для бесстолкновительной полностью замагниченной плазмы с учетом продольного силового равновесия электронов, а также вывести схему численного интегрирования по времени этой системы уравнений.
7. Вывести систему уравнений гибридного описания бесстолкновительной плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов, с учетом продольного силового равновесия электронов, а также вывести схему численного интегрирования по времени этой системы уравнений.
8. Вывести дивергентную форму уравнения силового баланса с исключенным электрическим полем для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов, а также получить из него векторную форму условия силового баланса в виде закона сохранения для стационарного пространственно одномерного токового слоя.
9. Построить законченную теорию для стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов на основе упомянутой выше соответствующей кинетической системы уравнений с учетом продольного силового равновесия электронов.
10. При помощи этой теории построить численную модель указанного тонкого токового слоя, в которой учитываются электростатические эффекты, электроны имеют распределение Масвелла–Больцмана и их вклад учитывается аналитически, а для протонов численно решается уравнение Власова.
11. Получить с помощью упомянутой выше модели симметричные конфигурации указанного тонкого токового слоя для достаточно боль-

шого набора входных параметров. Исследовать характер выполнения силового баланса, вид функции распределения протонов, влияние анизотропии давления электронов, а также зависимость конфигурации от величины гидродинамической скорости образующих слой потоков протонов.

12. Получить с помощью упомянутой выше модели несимметричные конфигурации указанного тонкого токового слоя и исследовать для них характер выполнения силового баланса.

Методы исследования

Используются несколько методов исследования: теоретические анализ и математические выкладки и рассуждения, а также метод математического моделирования, который включает в себя следующие этапы: теоретический анализ численных методов, разработку алгоритмов и комплексов программ, численное моделирование тонких токовых слоев, а также анализ результатов численного моделирования и сравнение этих результатов с данными измерений. Используемая в диссертации модель реализована в виде комплексов программ на языке Fortran.

Научная новизна

1. Показано, что система уравнений Власова–Максвелла в крупномасштабных задачах для медленных плазменных процессов в пространственно неоднородной плазме не позволяет моделировать электростатические эффекты, вызванные относительно очень малым отклонением от электронейтральности.
2. Впервые получена модификация системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а также схема её замыкания какой-либо системой уравнений переноса плазмы, в результате которого для определения полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащая частных производных по времени и определяющая поля по текущему пространственному распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям в рамках мгновенного дальнего действия.

3. Впервые получены замкнутые системы уравнений для описания безызлучательных процессов в бесстолкновительной плазме с учетом продольного силового равновесия электронов для 6-ти наиболее актуальных для физики космической плазмы вариантов системы уравнений переноса:

1) в случае, когда все компоненты плазмы не замагничены и описываются уравнениями Власова;

2) в случае, когда электроны замагничены и описываются уравнением Власова в дрейфовом приближении, а все ионы не замагничены и описываются уравнениями Власова;

3) в случае, когда все компоненты плазмы замагничены и описываются уравнениями Власова в дрейфовом приближении;

4) в случае замагниченных электронов и частично замагниченных ионов, когда электроны и замагниченные ионные компоненты описываются уравнениями Власова в дрейфовом приближении, а незамагниченные ионные компоненты описываются уравнениями Власова;

5) в случае, когда все компоненты плазмы замагничены и описываются системой уравнений многокомпонентной магнитной газовой динамики для замагниченной плазмы;

6) в случае гибридного описания плазмы, когда ионы описываются уравнениями Власова, а замагниченные электроны описываются в рамках газовой динамики с учетом квазинейтральности и силового равновесия электронов.

Полученные системы уравнений позволяют создавать численные модели для крупномасштабных процессов в космической плазме с шагом пространственной сетки порядка гирорадиуса тепловых протонов.

4. Впервые для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов получена новая форма уравнения силового баланса протонов, в которой исключено электрическое поле. Это уравнение необходимо в моделях токовых слоев для правильной постановки граничных условий и для контроля силового баланса.

Из этого уравнения получена векторная форма условия силового баланса в виде закона сохранения для стационарного пространственно одномерного токового слоя с учетом анизотропии давления электронов.

5. Впервые получен общий вид функции распределения ведущих центров замагниченных электронов как функции от интегралов их дрейфовой системы уравнений движения в стационарном пространственно двумерном токовом слое, в котором магнитное поле ортогонально току и имеет ненулевую нормальную компоненту, а бесстолкновительная плазма состоит из незамагниченных ионов и замагниченных электронов. Впервые выявлены наличие и важная роль популяции захваченных электронов.
6. Впервые для численного решения стационарного уравнения Власова разработаны и успешно применены два новых метода, которые позволяют выполнять основной объем вычислений на графических процессорах, и по сравнению с традиционно используемым методом частиц имеют ряд важных преимуществ. Это позволяет создавать численные модели крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме, заведомо недоступные для моделирования методом частиц.
7. Для стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов построена законченная теория с учетом электростатических эффектов и с кинетическим описанием замагниченных электронов функцией распределения Максвелла–Больцмана.
8. На основе этой теории создана численная модель, в которой образующие токовый слой протоны описываются стационарным уравнением Власова, которое решается численно, а электроны имеют функцию распределения Максвелла–Больцмана в стационарном электромагнитном поле, и их вклад учитывается аналитически.

Для численного решения стационарного уравнения Власова успешно применены указанные выше два новых метода, что позволило выполнить большой объем расчетов на хорошем персональном компьютере с мощным графическим процессором. В случае использования метода частиц для таких расчетов потребовался бы достаточно мощный кластерный суперкомпьютер.

9. Получен набор симметричных конфигураций указанного тонкого токового слоя, для которых очень точно выполнены условия силового баланса, и впервые рассчитана функция распределения протонов с высоким разрешением в пространстве скоростей, а также исследовано влияние на конфигурацию слоя анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости образующих токовый слой потоков протонов.
10. Впервые в численном моделировании получены и детально исследованы конфигурации тонкого токового слоя с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией. Конфигурации такого типа часто встречаются в данных измерений на космических аппаратах в хвосте магнитосферы Земли и на разных участках ее магнитопаузы, а также в солнечном ветре и в хвосте магнитосферы Юпитера.

Достоверность результатов

Достоверность результатов определяется строгостью и обоснованностью проведения теоретических выкладок, а также хорошим соответствием между данными измерений на космических аппаратах и результатами численного моделирования при помощи моделей, разработанных на основе новых теоретических достижений.

Научная и практическая ценность

Научную ценность представляют полученные в работе системы уравнений для описания крупномасштабных безызлучательных процессов в плазме в приближении квазинейтральности и с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, которые позволяют созда-

вать численные модели для крупномасштабных процессов в космической плазме ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра с шагом пространственной сетки порядка гирорадиуса тепловых протонов и временным разрешением порядка отношения этого шага к тепловой скорости протонов.

Также разработаны принципиально новые приемы моделирования плазменных процессов, которые позволяют в ходе расчетов выполнять на графических процессорах основной объем вычислений — расчет фазовых траекторий заряженных частиц.

Вместе это позволяет в ближайшей перспективе на доступных вычислительных ресурсах проводить физически корректное моделирование широкого круга крупномасштабных плазменных процессов в ионосфере, магнитосфере и в солнечном ветре, которое ранее было недостижимо, в том числе, разрабатывать совместную глобальную численную модель ионосферы и магнитосферы.

Также научную ценность имеет построенная на основе выведенной в работе системы уравнений законченная теория полностью кинетической модели для пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов.

Практическую ценность представляют созданные программные реализации указанной модели тонкого токового слоя, в которых используются параллельные вычисления на графических процессорах, и результаты численного моделирования тонкого токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы Земли, которые позволяют лучше интерпретировать данные измерений на космических аппаратах.

Кроме того, практическую ценность представляет полученная в работе новая дивергентная форма уравнения силового баланса протонов в бесстолкновительной плазме из протонов и замагниченных электронов, в которой исключено электрическое поле. Это уравнение необходимо в моделях токовых слоев для правильной постановки граничных условий и для контроля силового баланса.

Результаты, выносимые на защиту

1. Получена модификация системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности, а также схема ее замыкания системой уравнений переноса плазмы.
2. Получены замыкания модифицированной системы уравнений Максвелла для 6-ти наиболее актуальных вариантов системы уравнений переноса плазмы. В каждой из полученных систем для определения полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащая частных производных по времени, которая определяет поля по текущему пространственному распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям в рамках мгновенного дальнего действия.
3. Для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов получена новая дивергентная форма уравнения силового баланса протонов, в которой исключено электрическое поле. Из этого уравнения получена векторная форма условия силового баланса в виде закона сохранения для стационарного пространственно одномерного токового слоя с учетом анизотропии давления электронов.
4. Для стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов построена законченная теория с учетом электростатических эффектов и с кинетическим описанием замагниченных электронов функцией распределения Максвелла–Больцмана.
5. На основе этой теории построена численная модель, в которой протоны описываются стационарным уравнением Власова, а вклад электронов с функцией распределения Максвелла–Больцмана учитывается аналитически. Для численного решения стационарного уравнения Власова разработаны и успешно применены два новых

метода, которые позволяют выполнять основной объем вычислений на графических процессорах.

6. Получен набор симметричных конфигураций указанного тонкого токового слоя, для которых очень точно выполнены условия силового баланса, и впервые рассчитана функция распределения протонов с высоким разрешением в пространстве скоростей, а также исследовано влияние на конфигурацию слоя анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости образующих токовый слой потоков протонов.
7. Впервые в численном моделировании получены и детально исследованы конфигурации указанного тонкого токового слоя с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты были получены или автором лично, или при его непосредственном и руководящем участии. Вклад автора в эти результаты является основным. Содержание диссертации отражено в 21 научной статье в рецензируемых журналах из перечня ВАК, которые в большей части написаны в соавторстве с сотрудниками Полярного геофизического института, Института космических исследований РАН, Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ и Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. При подготовке этих публикаций автор участвовал в определении цели работ и в постановках задач, проводил аналитические выкладки и получал теоретические результаты, разрабатывал численные методы и реализующие их алгоритмы, планировал, руководил и участвовал в написании и отладке программ, проведении расчетов, визуализации и анализе результатов моделирования и их сравнении с данными измерений, формулировке выводов. При этом в работах [Sasunov et al., 2015, 2016] по стационарным токовым слоям автор выполнял численное моделирование.

Апробация работы

Представленные в работе результаты докладывались на отечественных конференциях по физике космической плазмы: на всех ежегодных конференциях "Физика плазмы в солнечной системе" (2006–2020 гг., Москва, ИКИ РАН), а также на всех конференциях Всероссийский ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений" (2006–2020 гг., Апатиты, ПГИ).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы более чем в 60 публикациях, в том числе в 21-й научной статье в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах из перечня ВАК, а также более чем в 10 статьях в других научных изданиях.

Структура и объем работы.

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

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

Глава I посвящена выводу модификации системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности, а также замыканию этой системы уравнений системой уравнений Власова. В *разделе I.1* изложено введение этой главы.

В *разделе I.2* рассматривается система уравнений Власова–Максвелла и анализируются условия для правильного воспроизведения электростатических эффектов в моделировании. Показано, что при моделировании с помощью системы Власова–Максвелла погрешность модели в относительной плотности заряда дает не меньшую относительную погрешность в потенциальной части электрического поля. Для глобаль-

ных численных моделей магнитосферы очень хорошим уровнем относительного отклонения от электронейтральности считается 10^{-1} , в то время как в реальности эта функция имеет порядок $\lesssim 10^{-6}$, то есть плотность заряда в численной модели завышена как минимум на 5 порядков. В результате в численной модели потенциальное электрическое поле, а значит и скорость электрического дрейфа, завышены на не меньшее число порядков. Это приводит к неправильной динамике плазмы и делает численную модель нереалистичной. Также в этом разделе для каждой компоненты плазмы рассматриваются различные формы уравнения потока импульса и выводится обобщенный закон Ома.

В *разделе I.3* анализируется система уравнений Власова–Дарвина и излагается один из вариантов преобразования в ней уравнений для полей к эллиптической форме за счет выражения частных производных по времени через пространственные производные с использованием обобщенного закона Ома. В результате для определения полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащая частных производных по времени, которая однозначно определяет поля в области расчетов по текущему распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям в рамках концепции мгновенного дальнего действия.

В *разделе I.4* изложен вывод модификации системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности и с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. В этой системе уравнений магнитное поле, как и следовало ожидать, описывается уравнениями Гаусса и Ампера. Важным новым результатом является получение для определения электрического поля двух уравнений: вытекающего из уравнений Ампера и Фарадея уравнения для двойного ротора электрического поля, в правой части которого стоит частная производная по времени от плотности полного тока, а также уравнения силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Эта система уравнений замыкается какой-либо системой уравнений переноса плазмы, которая позволяет рассчитать полную плотность тока и слагаемые в правой части в обобщенного закона Ома. В результате полностью

аналогично системе Власова–Дарвина для определения полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащая частных производных по времени, которая определяет поля по текущему пространственному распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям в рамках мгновенного дальнего действия. Также выводится форма обобщенного закона Ома с учетом квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля.

В *разделе I.5* рассматривается формальная запись системы уравнений Власова в приближении квазинейтральности. В этой системе в уравнениях для электрического поля используются моменты второго порядка. Важным новшеством этой системы является получение для соленоидальной части электрического поля линейного эллиптического уравнения 2-го порядка, которое в ходе численного решения на каждой итерации сводится к уравнению Пуассона.

В *разделе I.6* рассматривается схема численного интегрирования по времени этой системы уравнений. В *разделе I.7* приведено заключение к главе I.

Глава II посвящена системе уравнений Власова в случае наличия замагниченных компонент плазмы. В *разделе II.1* изложено введение этой главы.

В *разделе II.2* рассматриваются условия замагниченности и их следствия. Показано, что из замагниченности любой ионной компоненты околоземной плазмы вытекает замагниченность электронов, из которой, в свою очередь, следует безызлучательность полей и выполнение условий квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Получены выражения для ортогональной магнитному полю части плотности тока замагниченной компоненты, а также уравнение потока импульса для замагниченной ионной компоненты и для замагниченных электронов. Также для бесстолкновительной плазмы с замагниченными электронами получено новое выражение для электрического поля через магнитное поле, концентрацию и плотность тока электронов, а также дивергенцию их тензора давления.

В *разделе II.3* рассматривается уравнение Власова в дрейфовом

приближении. При этом для замагниченной компоненты рассматривается система уравнений движения ведущего центра, функция распределения ведущих центров, гидродинамические переменные, тензор давления и его дивергенция, а также вклад компоненты в плотность тока и обобщенный закон Ома. Кроме того, рассматривается уравнение силового равновесия замагниченных электронов вдоль магнитного поля и форма обобщенного закона Ома в случае плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов.

В *разделе II.4* 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.

В *разделе II.5* рассматривается система уравнений Власова в дрейфовом приближении в случае полностью замагниченной плазмы. Сначала выводятся выражения для полных продольного и поперечного давлений плазмы, затем через них выражается плотность тока, а также выводится форма обобщенного закона Ома. Далее в *подразделе II.5.1* рассматривается формальная запись рассматриваемой системы уравнений. После этого в *подразделе II.5.2* изложена схема численного интегрирования по времени этой системы уравнений.

В *разделе II.6* рассматривается система уравнений Власова в случае замагниченных электронов и частично замагниченных ионов. В *разделе II.7* приведено заключение ко второй главе.

Глава III посвящена газодинамическому и гибриднему описанию бесстолкновительной космической плазмы с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. В *разделе III.1* изложено введение этой главы.

В *разделе III.2* для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов рассматривается вывод новой дивергентной формы уравнения силового баланса протонов, в которой электрическое поле выражено через магнитное поле и дивергенцию тензора давления электронов.

В *разделе III.3* 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. Также показано противоречие между уравнением индукции для определения магнитного поля в этой системе и приближением мгновенного дальнего действия.

В *разделе III.4* рассматривается вывод системы уравнений магнитной газовой динамики для замагниченной компоненты бесстолкновительной плазмы, а также вид этой системы уравнений для замагниченных электронов с учетом условия их продольного силового равновесия и условия квазинейтральности.

В *разделе III.5* 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.

В *разделе III.6* 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 *разделе III.7* приведено заключение к третьей главе.

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 *разделе IV.1* изложено введение этой главы.

В *разделе IV.2* изложена постановка задачи.

В *разделе IV.3* получен общий вид функции распределения ве-

дущих центров замагниченных электронов в рассматриваемом токовом слое. Показано, что в рассматриваемом случае система уравнений движения ведущего центра для электронов является четырехмерной и имеет 3 независимых точных интеграла: магнитный момент, гамильтониан и единственную компоненту векторного потенциала, то есть полностью интегрируется. Это означает, что функция распределения ведущих центров замагниченных электронов является функцией трех перечисленных интегралов. Также показано, что если в центре слоя величина магнитного поля меньше, чем на его границах, то обязательно присутствует популяция захваченных электронов, которая обеспечивает электронейтральность и является входным параметром модели.

В *разделе IV.4* изложена формулировка системы уравнений и граничные условия модели стационарного пространственно двумерного симметричного токового слоя, а также схема итерационного процесса численного решения уравнений этой модели.

В *разделе IV.5* рассматривается система уравнений модели в случае, когда функция распределения электронов является распределением Максвелла–Больцмана в стационарном электромагнитном поле.

В *разделе IV.6* приведено заключение к четвертой главе.

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 падающими вдоль силовых линий магнитного поля встречными потоками незамагниченных горячих протонов. В *разделе V.1* изложено введение этой главы.

В *разделе V.2* изложен вывод векторного уравнения силового баланса в одномерном токовом слое и доказывается равенство нулю электронного тока в случае изотропных электронов.

В *разделе V.3* рассматривается система уравнений и граничных условий модели пространственно одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме с заданной нормальной компонентой магнитного поля и замагниченными электронами, имеющими распределе-

ние Максвелла–Больцмана, в котором магнитное поле и электрическое поле ортогональны току, то есть у магнитного поля сдвиговая компонента отсутствует.

В *разделе V.4* рассматривается система уравнений и граничных условий модели пространственно одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме с заданной нормальной компонентой магнитного поля и замагниченными электронами, имеющими распределение Максвелла–Больцмана, в котором у магнитного поля имеется сдвиговая компонента. В *разделе V.5* рассматриваются основные детали численной модели.

В *разделе V.6* изложены результаты моделирования рассматриваемого симметричного тонкого токового слоя без сдвиговой компоненты магнитного поля. В *подразделе V.6.1* изложены результаты моделирования для случая изотропных электронов. В *подразделе V.6.2* изложены результаты моделирования для случая анизотропных электронов.

В *разделе V.7* 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 *разделе V.8* приведено заключение к пятой главе.

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Впервые получена модификация системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а также схе-

ма ее замыкания системой уравнений переноса плазмы. Полученная система описывает осредненное по продольным плазменным колебаниям электромагнитное поле на пространственных масштабах на 3 и более порядков больших дебаевского расстояния электронов. В результате замыкания полученной системы уравнений какой-либо системой уравнений переноса плазмы для определения полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащая частных производных по времени, которая определяет поля по текущему пространственному распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям в рамках мгновенного дальнего действия.

2. Впервые получены замыкания модифицированной системы уравнений Максвелла для 6-ти наиболее актуальных для физики космической плазмы вариантов системы уравнений переноса плазмы:
 - 1) в случае, когда все компоненты плазмы не замагничены и описываются уравнениями Власова;
 - 2) в случае, когда электроны замагничены и описываются уравнением Власова в дрейфовом приближении, а все ионы не замагничены и описываются уравнениями Власова;
 - 3) в случае, когда все компоненты плазмы замагничены и описываются уравнениями Власова в дрейфовом приближении;
 - 4) в случае замагниченных электронов и частично замагниченных ионов, когда электроны и замагниченные ионные компоненты описываются уравнениями Власова в дрейфовом приближении, а незамагниченные ионные компоненты описываются уравнениями Власова;
 - 5) в случае, когда все компоненты плазмы замагничены и описываются системой уравнений многокомпонентной магнитной газовой динамики для замагниченной плазмы;
 - 6) в случае, гибридного описания плазмы, когда незамагниченные ионы описываются уравнениями Власова, а замагниченные электроны описываются в рамках газовой динамики с учетом квазинейтральности и силового равновесия электронов.

Эти системы уравнений позволяют создавать численные модели для крупномасштабных процессов в космической плазме с пространственной разрешением порядка гирорадиуса тепловых протонов.

3. Впервые для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов получена новая дивергентная форма уравнения силового баланса протонов, в которой исключено электрическое поле. Эта форма уравнения необходима в моделях токовых слоев для правильной постановки граничных условий и для контроля силового баланса. Из этого уравнения получена векторная форма условия силового баланса в виде закона сохранения для стационарного пространственно одномерного токового слоя с учетом анизотропии давления электронов.
4. Впервые получен общий вид функции распределения замагниченных электронов как функции от интегралов их дрейфовой системы уравнений движения в стационарном пространственно двумерном токовом слое, в котором магнитное поле ортогонально току и имеет ненулевую нормальную компоненту, а бесстолкновительная плазма состоит из незамагниченных протонов и замагниченных электронов. Впервые выявлены наличие и важная роль популяции захваченных электронов.
5. Впервые для численного решения стационарного уравнения Власова разработаны и успешно применены два новых метода, которые позволяют выполнять основной объем вычислений на графических процессорах, и по сравнению с традиционно используемым методом частиц имеют ряд важных преимуществ, что позволяет создавать численные модели крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме, заведомо недоступные для моделирования методом частиц.
6. Для стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме из незамагниченных прото-

нов и замагниченных электронов построена законченная теория с учетом электростатических эффектов и с кинетическим описанием замагниченных электронов функцией распределения Максвелла–Больцмана.

7. На основе этой теории создана численная модель, в которой образующие токовый слой протоны описываются стационарным уравнением Власова, а электроны имеют функцию распределения Максвелла–Больцмана в стационарном электромагнитном поле, и их вклад учитывается аналитически. Для численного решения стационарного уравнения Власова разработаны и успешно применены два новых метода, которые позволяют выполнять основной объем вычислений на графических процессорах. Это позволило выполнить большой объем расчетов на хорошем персональном компьютере с мощным графическим процессором. В случае использования метода частиц для таких расчетов потребовался бы достаточно мощный кластерный суперкомпьютер.
8. Получен набор симметричных конфигураций указанного тонкого токового слоя, для которых очень точно выполнены условия силового баланса, и впервые рассчитана функция распределения протонов с высоким разрешением в пространстве скоростей, а также исследовано влияние на конфигурацию слоя анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости образующих токовый слой потоков протонов.
9. Впервые в численном моделировании получены и детально исследованы конфигурации указанного тонкого токового слоя с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией. Конфигурации такого типа часто встречаются в данных измерений на космических аппаратах в хвосте магнитосферы Земли и на разных участках ее магнитопаузы, а также в солнечном ветре и в хвосте магнитосферы Юпитера.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Бородачев Л.В., Мингалёв И.В., Мингалёв О.В.* Дрейфовый алгоритм расчёта движения заряда в дарвиновской модели плазмы. // Журнал вычислительной математики и математической физики (ЖВМ и МФ). 2003, Том 43, № 3, С. 467–480.
2. *Mingalev O.V., Golovchanskaya I.V., Maltsev Y.P.* Simulation of the interchange instability in a magnetospheric substorm site. // *Annales Geophysicae*. 2006. V. 24. № 6. P. 1685–1693.
3. *Мингалев О. В., Мингалев И. В., Мингалев В. С.* Двумерное численное моделирование динамики мелкомасштабной неоднородности в околоземной плазме. // *Космические исследования*. 2006. Т. 44. № 5. С. 416–427.
4. *Бородачев Л.В., Мингалев И.В., Мингалев О.В.* Численное решение дискретной модели Власова–Дарвина на основе оптимальной переформулировки полевых уравнений. // *Математическое моделирование*. 2006. Т. 18. № 11. С. 117–125.
5. *Мингалев О.В., Мингалев И.В., Малова Х.В., Зелёный Л.М.* Численное моделирование плазменного равновесия в одномерном токовом слое с ненулевой нормальной компонентой магнитного поля. // *Физика плазмы*. 2007. Т. 33, № 11, С. 1028–1041.
6. *Мингалев О.В., Мингалев И.В., Малова Х.В., Зелёный Л.М., Артемьев А.В.* Несимметричные конфигурации тонкого токового слоя с постоянной нормальной компонентой магнитного поля // *Физика плазмы*. 2009. Т. 35, № 1, С. 85–96.
7. *Малова Х.В., Зелёный Л.М., Мингалев О.В., Мингалев И.В., Попов В.Ю., Артемьев А.В., Петрукович А.А.* Токовый слой в бесстолкновительной немаксвелловской плазме: самосогласованная теория, моделирование и сравнение со спутниковыми экспериментами. // *Физика плазмы*. 2010. Т. 36, № 10, С. 897–915.
8. *Мингалев О.В., Мингалева Г.И., Мельник М.Н., Мингалев В.С.* Численное моделирование поведения сверхмелкомасштабных неод-

нородностей в слое F ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 2010, Т. 50, № 5, С. 671–682.

9. *Mingalev O.V., Mingaleva G.I., Melnik M.N., Mingalev V.S.* Numerical simulation of the time evolution of small-scale irregularities in the F-layer ionospheric plasma // International Journal of Geophysics. 2011. Volume 2011, Article ID 353640, doi:10.1155/2011/353640.
10. *Мингалев О.В., Мингалев И.В., Мельник М.Н., Артемьев А.В., Малова Х.В., Попов В.Ю., Шен Чао, Зелёный Л.М.* Кинетические модели токовых слоев с широм магнитного поля. // Физика плазмы. 2012. Т. 38, № 4, С. 329–344.
11. *Malova H.V., Popov V.Yu., Mingalev O.V., Mingalev I.V., Mel'nik M.N., Artemyev A.V., Petrukovich A.A., Delcourt D.C., Shen C., Zelenyi L.M.* Thin current sheets in the presence of a guiding magnetic field in the Earth's magnetosphere // J. Geophys. Res. 2012. VOL. 117, A04212, doi:10.1029/2011JA017359
12. *Grigorenko E.E., Malova H.V., Artemyev A.V., Mingalev O.V., Kronberg E.A., Koleva R., Daly P.W., Cao J.B., Sauvaud J.-A., Owen C.J., Zelenyi L.M.* Current sheet structure and kinetic properties of plasma flows during a near-Earth magnetic reconnection under the presence of a guide field // J. Geophys. Res. Space Physics. 2013. VOL. 118, P. 3265–3287, doi: 10.1002/jgra.50310
13. *Sasunov Y., Khodachenko M., Alexeev I., Belenkaya E., Semenov V., Kubyshkin I., Mingalev O.* Investigation of scaling properties of a thin current sheet by means of particle trajectories study // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 02/2015. 120(3). doi:10.1002/2014JA020486
14. *Malova H.V., Mingalev O.V., Grigorenko E.E., Mingalev I.V., Melnik M.N., Popov V.Yu., Delcourt D.C., Petrukovich A.A., Shen C., Rong D., Zelenyi L.M.* Formation of self-organized shear structures in thin current sheets // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 05/2015. VOL. 120, DOI: 10.1002/2014JA020974

15. *Sasunov Y.L., Khodachenko M.L., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Mingalev O.V., Melnik M.N.* The influence of kinetic effect on the MHD scalings of a thin current sheet // *Journal of Geophysical Research. Space Physics.* 12/2016. VOL. 121, DOI: 10.1002/2016JA023162
16. *Мингалев О.В., Мингалев И.В., Малова Х.В., Мельник М.Н., Зелёный Л.М.* Система кинетических уравнений для описания крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме. // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43, № 10, С. 837–849.
17. *Мингалев О.В., Мингалев И.В., Мельник М.Н., Ахметов О.И., Суворова З.В.* Новый метод численного интегрирования системы Власова–Максвелла. // *Математическое моделирование.* 2018, Т. 30, № 10, С. 21–43.
18. *Мингалев О.В., Мингалев И.В., Малова Х.В., Мерзлый А.М., Зелёный Л.М.* Система кинетических уравнений для бесстолкновительной космической плазмы в приближении силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. // *Физика плазмы.* 2018. Т. 44, № 11, С. 889–904.
19. *Мингалев О.В., Малова Х.В., Мингалев И.В., Мельник М.Н., Сецко П.В., Зелёный Л.М.* Модель тонкого токового слоя в хвосте магнитосферы Земли с кинетическим описанием замагниченных электронов. // *Физика плазмы.* 2018. Т. 44, № 10, С. 769–790.
20. *Мингалев О.В., Хабарова О.В., Малова Х.В., Мингалев И.В., Кислов Р.А., Мельник М.Н., Сецко П.В., Зелёный Л.М., Zank G.P.* Моделирование ускорения протонов в магнитном острове в складке гелиосферного токового слоя // *Астрономический вестник.* 2019. Т. 53, № 1, С. 34–60.
21. *Мингалев О.В., Мингалев И.В., Малова Х.В., Мерзлый А.М., Мингалев В.С., Хабарова О.В.,* Описание крупномасштабных процессов в околоземной космической плазме. // *Физика плазмы.* 2020. Т. 46, № 4, С. 329–350.