



УТВЕРЖДАЮ
Директор ПГИ
д.ф.-м.н.

В.В. Козелов / Козелов Б.В. /
20 » *декабря* 2019 года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

научного семинара апатитского отделения
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
"Полярный геофизический институт" (ПГИ)

Диссертация Мингалёва Олега Викторовича на тему «Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме и численное моделирование тонких токовых слоев» выполнена в секторе теоретического моделирования (сектор № 203) Полярного геофизического института.

В 1992 году соискатель окончил Факультет аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института (МФТИ) по специальности «прикладная математика и физика» и поступил в аспирантуру этого института. В 1995 году соискатель окончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию "Неприводимые представления общих соотношений коммутации. Законы сохранения и асимптотика спектра квантовых гамильтонианов." по специальности «математическая физика» (номер специальности 01.01.03) в диссертационном совете при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. В период подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук соискатель работал в Полярном геофизическом институте в должности заведующего сектором теоретического моделирования.

По результатам рассмотрения диссертации «Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме и численное моделирование тонких токовых слоев» принято следующее заключение:

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Мингалёва Олега Викторовича 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.

В плазменной оболочке Земли, которая состоит из ионосферы, магнитосферы и обтекающего ее солнечного ветра, протекают взаимосвязанные 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 деятельность высокотехнологичной сферы современного общества.

При этом в ионосфере и в магнитосфере имеется относительно крупномасштабное и медленно изменяющееся сглаженное по быстрым мелкомасштабным процессам распределение электромагнитного поля и плазмы, которое определяется глобальной магнитосферно-ионосферной токовой системой. На фоне этого распределения происходят более мелкомасштабные процессы, в частности, распространение различных плазменных волн.

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 важных задач физики околоземного космического пространства. Построение такой картины на основе только данных наземных и спутниковых измерений невозможно, во-первых, из-за больших размеров этой системы, сложности протекающих в ней процессов и большой изменчивости системы 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 аппаратах 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 очень большое 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 могла бы быть корректно численно решена с физически разумным пространственным и временным разрешением при помощи имеющихся вычислительных ресурсов.

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

Во всех системах уравнений, применяемых для описания крупномасштабных медленных плазменных процессов, в уравнениях Максвелла отбрасывается ток смещения, что означает переход к мгновенному дальнему действию. В рамках мгновенного дальнего действия 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, в которых уравнения для полей преобразованы к эллиптической форме. Система уравнений Власова-Дарвина получается из исходной системы Власова-Максвелла в результате отбрасывания соленоидальной части тока смещения, что соответствует отбрасыванию 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 вдоль магнитного поля 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 определяется изменениями магнитного поля по времени.

Существующие глобальные численные модели магнитосферы можно разделить на три типа. К первому типу относятся модели, основанные на численном решении различных вариантов системы уравнений одножидкостной магнитной газовой динамики — так называемые МГД-модели. Ко второму типу относятся 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. К третьему типу относятся 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.

Результаты использования моделей всех трех типов за последние десятилетия показали, что они не могут воспроизвести даже на минимальном качественном уровне важнейшие особенности магнитосферы, в частности, кольцевой ток, токовый слой хвоста, продольные токи в полярной области.

Поэтому рассматриваемые в диссертации задачи являются важными и актуальными.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

Глава I является наиболее важной и посвящена выводу системы уравнений для описания магнитного и электрического полей в крупномасштабных безызлучательных процессах в околоземной космической плазме в приближении силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а также замыканию этой системы уравнений системой уравнений Власова.

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 на несколько порядков большую относительную погрешность в потенциальной части электрического поля. Для глобальных численных моделей магнитосферы 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 на 5-7 порядков. В результате в численной модели потенциальное электрическое поле, а значит и скорость электрического дрейфа, завышены на еще большее число порядков. Это приводит к неправильной динамике плазмы и делает численную модель нереалистичной.

Кроме того, в разделе I.2 для каждой компоненты плазмы рассматриваются две формы уравнения потока импульса, а также выводится обобщенный закон Ома.

В разделе I.3 анализируется система уравнений Власова-Дарвина и излагается один из вариантов преобразования ее 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. Эта система уравнений однозначно определяет поля в области расчетов в рамках концепции мгновенного дальнего действия по текущему распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям.

В разделе I.4 изложен вывод системы уравнений для описания магнитного и электрического полей в крупномасштабных безызлучательных процессах в околоземной космической плазме в приближении квазинейтральности и 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, в котором фигурирует дивергенция тензора давления электронов.

Эта система уравнений замыкается системой уравнений переноса плазмы, которая позволяет рассчитать полную плотность тока, правую часть в обобщенном законе Ома и дивергенцию тензора давления электронов. 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, которая наиболее удобна для замыкания уравнений для полей в приближении силового равновесия электронов вдоль магнитного поля.

В разделе I.5 рассматривается формальная запись системы уравнений Власова в приближении силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. 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.

Глава II посвящена системе уравнений Власова в случае наличия замагниченных компонент плазмы. 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 ее 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 в приближении 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 в приближении силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. 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. Это уравнение необходимо для правильной постановки граничных условий в моделях токовых слоев и для контроля силового баланса в этих моделях.

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 вывод 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 в приближении 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 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 изложен вывод общего вида функции распределения ведущих 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 перечисленных интегралов. Также показано, что если в центре слоя величина магнитного поля меньше, чем на его границах, то обязательно присутствует популяция захваченных электронов, которая играет важную роль 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 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.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 в случае, когда магнитное поле ортогонально току, то есть у него сдвиговая компонента отсутствует. В разделе V.4 рассматривается система уравнений и граничных условий модели в случае, когда 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 приложении изложены два новых метода численного решения стационарного уравнения Власова. В заключении сформулированы результаты диссертационной работы, а также положения, которые выносятся на защиту.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Научные результаты, представленные в диссертации, были получены или автором лично, или при его непосредственном и руководящем участии. Вклад автора во все рассмотренные в диссертации задачи является основным. Автор выполнил физические и математические постановки всех задач, вошедших в диссертационную работу, проводил аналитические выкладки и получил 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.

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 отвечал за представленное в них численное моделирование, участвовал в определении цели работ и в постановках задач, формулировке выводов.

Научная новизна результатов исследования

Впервые получена система уравнений для описания магнитного и электрического полей в крупномасштабных безызлучательных процессах в космической плазме ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра в приближении квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля, а также схема ее замыкания. В этой системе уравнений магнитное поле определяется из уравнений Гаусса и Ампера. Новым результатом является получение для определения электрического поля системы из 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.

Впервые получены замкнутые системы уравнений для описания безызлучательных процессов в бесстолкновительной плазме в приближении продольного силового равновесия электронов для 6-ти наиболее актуальных для физики космической плазмы случаев:

- 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, которые 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.

В каждой из этих систем 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.

Впервые для бесстолкновительной плазмы из протонов и замагниченных электронов получена новая форма уравнения силового баланса протонов, в которой электрическое поле выражено через магнитное поле и дивергенцию тензора давления электронов. Последнее уравнение необходимо для правильной постановки граничных условий в моделях токовых слоев и для контроля силового баланса в этих моделях. Из этого уравнения впервые получена общая форма уравнения силового баланса в пространственно одномерном токовом слое с учетом анизотропии давления электронов.

Впервые получен общий вид функции распределения замагниченных электронов как функции от интегралов их дрейфовой системы уравнений движения в стационарном пространственно двумерном бесстолкновительном токовом слое, в котором магнитное поле ортогонально току и имеет ненулевую нормальную компоненту. Впервые выявлены наличие и важная роль популяции захваченных электронов.

Впервые построена законченная теория для стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов с учетом электростатических эффектов и кинетическим описанием замагниченных электронов. На основе указанной выше теории впервые для бесстолкновительной плазмы из незамагниченных протонов и замагниченных электронов построена полностью кинетическая численная модель стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной нормальной компонентой магнитного поля, в которой полностью учитываются электростатические эффекты. В модели образующие токовый слой протоны описываются уравнением Власова, которое решается численно, а электроны имеют функцию распределения Максвелла-Больцмана в стационарном электромагнитном поле, и их вклад учитывается аналитически. В модели используется ряд новых методических приемов, которые на хорошем персональном компьютере с мощным графическим процессором позволили выполнить большой объем расчетов, для которых без использования указанных новых приемов потребовался бы достаточно мощный кластерный суперкомпьютер.

Впервые в численном моделировании получены симметричные конфигурации стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с заданной нормальной компонентой магнитного поля, в которых очень точно выполнены условия силового баланса. % для большого набора входных параметров. При этом впервые рассчитана функция распределения протонов и детально исследованы электростатические эффекты с кинетическим описанием замагниченных электронов, а также исследовано влияние на конфигурацию слоя анизотропии давления электронов и гидродинамической скорости образующих токовый слой потоков протонов.

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.

Практическая значимость и ценность исследования

Предложенный в работе подход позволяет вывести следующие системы уравнений.

- 1) Систему уравнений для корректного описания плазмы E-слоя ионосферы, в которой учитывается замагниченность электронов, то есть для них системой уравнений переноса является "модифицированная" система Чу-Гольдбергера-Лоу с учетом трения об нейтральные компоненты и фотохимии. При этом системой уравнений переноса для незамагниченных ионных компонент является полная система уравнений газовой динамики с учетом трения об нейтральные компоненты и фотохимии.
- 2) Систему уравнений для корректного описания плазмы F-слоя ионосферы, в которой учитывается замагниченность электронов и ионов, то есть для них системой уравнений

переноса является "модифицированная" система ЧГЛ с учетом трения об нейтральные компоненты и фотохимии.

- 3) Систему уравнений для корректного описания плазмы переходной области между F-слоем ионосферы и ближней магнитосферой.

Перечисленные выше, а также полученные в диссертации системы уравнений позволяют создавать численные модели для космической плазмы ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра с шагом пространственной сетки порядка гирорадиуса тепловых протонов и временным разрешением порядка отношения этого шага к тепловой скорости протонов. В этих моделях будет физически корректно рассчитываться полностью пространственно трехмерное электрическое поле, причем будет правильно рассчитываться его соленоидальная часть, которая создается нестационарностью магнитного поля и во время магнитных бурь и суббурь вызывает сильные геоиндукционные токи в наземных технических системах.

Практическую 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.

Также 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 форма уравнения силового баланса протонов в бесстолкновительной плазме из протонов и замагниченных электронов, в которой электрическое поле выражено через магнитное поле и дивергенцию тензора давления электронов. Это уравнение необходимо для правильной постановки граничных условий в моделях токовых слоев и для контроля силового баланса в этих моделях.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Получена система уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности, а также схема ее замыкания системой уравнений переноса плазмы.
2. Получены замыкания этой системы уравнений 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. Эта форма уравнения необходима в моделях токовых слоев. Из этого уравнения впервые получена общая форма уравнения силового баланса в стационарном пространственно одномерном токовом слое 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 тонкого токового слоя с "колоколообразным" профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

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. Основные результаты диссертации опубликованы в 21 статье в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

- 1) *Бородачёв 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, стр. 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, стр. 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, стр. 897–915.
- 8) *Мингалев О.В., Мингалева Г.И., Мельник М.Н., Мингалев В.С.* Численное моделирование поведения сверхмелкомасштабных неоднородностей в слое F ионосферы // *Геоматизм 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*, 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, стр. 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) E. E. Grigorenko, H. V. Malova, A. V. Artemyev, O. V. Mingalev, E. A. Kronberg, R. Koleva, P. W. Daly, J. B. Cao, J.-A. Sauvaud, C. J. Owen, and L. M. Zelenyi. 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, 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*. 2015. VOL. 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*. 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*. 2016. VOL. 121, DOI: 10.1002/2016JA023162.
- 16) *Мингалеv О.В., Мингалеv 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, стр. 837–849.
- 17) *О.В. Мингалеv, И.В. Мингалеv, М.Н. Мельник, О.И. Ахметов, З.В. Суворова,* Новый метод численного интегрирования системы Власова-Максвелла. // *Математическое моделирование*. 2018, том 30, № 10, стр. 21-43.
- 18) *Мингалеv О.В., Мингалеv 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, стр. 889–904.
- 19) *Мингалеv О.В., Малова Х.В., Мингалеv 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, стр. 769–790.
- 20) *О.В. Мингалеv, О.В. Хабарова, Х.В. Малова, И.В. Мингалеv, Р.А. Кислов, М.Н. Мельник, П.В. Сецко, Л.М. Зелёный, G.P. Zank,* Моделирование ускорения протонов в магнитном острове в складке гелиосферного токового слоя // *Астрономический вестник*. 2019. Т. 53, № 1, стр. 34-60.
- 21) *Мингалеv О.В., Мингалеv И.В., Малова Х.В., Мерзлый А.М., Мингалеv В.С., Хабарова О.В.,* Описание крупномасштабных процессов в околоземной космической плазме. // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46, № 3.

Другие публикации автора

Имеется ещё более 33 публикаций в рецензируемых журналах, часть из которых индексируется в базе данных Web of Science.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 01.03.03 – «физика Солнца»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 01.03.03 – «физика Солнца».

ВЫВОД

Из вышеизложенного следует, что в диссертации Мингалева Олега Викторовича представлены новые научные результаты в рамках актуальной и современной темы физики Солнца. Тематика исследований соответствует специальности 01.03.03 – «физика Солнца», а диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационной работе на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация Мингалева Олега Викторовича на тему «Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме и численное моделирование тонких токовых слоев» рекомендуется к защите по специальности 01.03.03 – «физика Солнца».

Заместитель директора ПГИ
по научной работе

к.ф.-м.н.



Орлов К.Г.