

УТВЕРЖДАЮ

Исполняющий обязанности

директора ПГИ

Д.ф.-м.н.



 Мингалев И.В. /  
« 18 » марта 2022 года

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация Мингалева 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**

Диссертация посвящена изучению тонких токовых слоев в магнитосфере Земли и в солнечном ветре, а также выводу систем уравнений, которые позволяют разрабатывать экономичные численные модели крупномасштабных медленно изменяющихся структур в околоземной космической плазме ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра.

Важными задачами физики магнитосферы Земли и солнечного ветра является изучение крупномасштабных медленно изменяющихся магнитоплазменных структур в магнитосфере и в ближней гелиосфере. В этих структурах, как правило, имеются токовые системы и тонкие токовые слои (далее ТТС), чьи толщину сравнимы с характерными тепловыми гирорадиусами протонов на границах слоя.

Тонкие токовые слои часто возникают в солнечном ветре на границе неоднородных структур, которые образуются в результате корональных выбросов массы или потоков из корональных дыр. Примерами ТТС являются гелиосферный токовый слой (ГТС), головная ударная волна, магнитопауза и токовый слой хвоста магнитосферы Земли. Также ТТС

обнаружены в магнитосферах других планет солнечной системы: Юпитера, Меркурия и в малых магнитосферах Марса и Венеры.

Также в последние годы в хвосте магнитосферы Земли и в хвосте магнитосферы Марса были обнаружены сверхтонкие токовые слои (далее СТТС), вложенные в более толстые ионные ТТС. Толщина этих СТТС сравнима с тепловыми гирорадиусами электронов на границах слоя, которые на порядок меньше, чем характерные тепловые гирорадиусы протонов на границах слоя. Такие СТТС образуются встречными потоками электронов. В ТТС ближнего хвоста магнитосферы Земли было установлено наличие встречных продольных потоков более горячих электронов дополнительно к их основной фоновой популяции. Относительная доля пролетной популяции составляла порядка 20–30% на краях слоя.

Важную роль в физике магнитосферы играет магнитопауза, которая разделяет более плотную и холодную плазму переходного слоя от более разреженной и горячей плазмы магнитосферы. При переходе через этот ТТС происходит резкое изменение как магнитного поля, так и параметров плазмы, а также потенциала электрического поля. Внутри магнитопаузы присутствуют сильные электростатические эффекты, которые создают значительное электрическое поле.

Ввиду указанных обстоятельств изучение ТТС и их численное моделирование сохраняет актуальность в последние десятилетия.

Также в последние десятилетия активно развивается численное моделирование разнообразных процессов, протекающих в бесстолкновительной космической плазме, полное описание которых дает система уравнений Власова–Максвелла. Корректное описание достаточно медленных процессов дает ее безызлучательной (магнитоиндукционный) предел — система уравнений Власова–Дарвина, которая получается в результате отбрасывания соленоидальной части тока смещения, что соответствует переходу к мгновенному дальнему действию. Система уравнений для полей в системе Власова–Дарвина может быть преобразована к системе уравнений эллиптического типа, в которых с помощью обобщенного закона Ома исключены частные производные по времени.

Однако с помощью систем Власова–Максвелла и Власова–Дарвина невозможно построить физически корректные и достаточно экономичные численные модели крупномасштабных медленных процессов в околоземной космической плазме. Доступные вычислительные ресурсы позволяют строить корректные модели указанных процессов для пространственно трехмерных случаев только с относительно небольшим размером области моделирования. Это обусловлено следующими причинами.

Во многих актуальных крупномасштабных задачах размер области моделирования превосходит характерное дебаевское расстояние электронов на девять и более порядков. При этом характерный пространственный масштаб изменения полей и параметров плазмы позволяет иметь шаг пространственной сетки на 2-3 порядка больше характерного дебаевского расстояния электронов. На таких масштабах плазму можно считать квазинейтральной. Время, на которое требуется рассчитывать поведение модельной системы, также превосходит характерный период плазменных колебаний электронов на девять и более порядков.

Имеется два типа методов численного решения систем уравнений Власова–Максвелла и Власова–Дарвина: сеточные методы и варианты метода крупных частиц. Сеточные методы по сравнению с методом крупных частиц позволяют получить лучшую точность, но требуют на порядки большего расхода вычислительных ресурсов на одну ячейку пространственной сетки, а также намного менее адаптивны. Поэтому сеточные методы не могут применяться для моделирования большей части крупномасштабных задач в космической плазме, и для этих целей широко применяются модели на основе метода крупных частиц.

Однако для корректного моделирования методом крупных частиц необходимо выполнение для модельной плазмы условий аппроксимации дебаевской экранировки.

Выполнение этих условий, в свою очередь, требует больших расходов вычислительных ресурсов на одну реальную дебаевскую ячейку. По этой причине современный уровень доступных вычислительных ресурсов позволяет проводить пространственно трехмерное корректное моделирование с размером области расчетов порядка нескольких тысяч характерных дебаевских расстояний.

В численных моделях на основе метода крупных частиц используется набор модельных упрощений, который делает модельную плазму существенно отличной от реальной и на несколько порядков увеличивает электрическое поле в модели. Последнее приводит к искажению динамики модельной плазмы по сравнению с реальной и нарушает реалистичность численной модели.

Таким образом, важной задачей является получение системы уравнений, которая бы позволила в ряде актуальных задач правильно рассчитывать осредненное по плазменным колебаниям крупномасштабное электрическое поле, возникающее за счет относительно малого разделения заряда на масштабах много меньших чем шаг пространственной сетки.

Поэтому рассматриваемая в диссертации тема исследований является важной и актуальной.

## **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 посвящена выводу квазинейтрального предела системы уравнений Максвелла для плазмы, а также замыканию этой системы уравнений системой уравнений Власова. В разделе I.1 изложено введение этой главы.

В разделе I.2 анализируются условия, необходимые для правильного воспроизведения электростатических эффектов в численной модели на основе системы уравнений Власова–Максвелла. Также в этом разделе рассматриваются различные формы уравнения потока импульса и выводится обобщенный закон Ома.

В разделе I.3 рассмотрены система уравнений Власова–Дарвина и 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 разделе I.4 изложен вывод квазинейтрального предела системы уравнений Максвелла для плазмы. 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.

В разделе I.5 рассматривается формальная запись системы уравнений Власова–Дарвина в приближении квазинейтральности.

В разделе I.6 приведены выводы главы I.

Глава II посвящена системе уравнений Власова–Дарвина 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.

В разделе II.3 для замагниченной компоненты плазмы рассматривается уравнение Власова в дрейфовом приближении, а также определения гидродинамических переменных и вклад компоненты в плотность тока и обобщенный закон Ома.

В разделе II.4 рассматривается система уравнений Власова–Дарвина в случае плазмы из незамагниченных ионов и замагниченных электронов.

В разделе II.5 рассматривается система уравнений Власова–Дарвина в случае полностью замагниченной плазмы.

В разделе II.6 рассматривается система уравнений Власова–Дарвина в случае замагниченных электронов и частично замагниченных ионов.

В разделе II.7 рассматривается вывод уравнений силового баланса в квазинейтральной бесстолкновительной плазме. В разделе II.8 приведено заключение ко второй главе.

Глава III посвящена численной модели стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя (далее сокращенно ТТС) 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 ионов. В разделе III.1 изложено введение этой главы.

В разделе III.2 изложена постановка задачи и получены выражения для плотности тока замагниченных электронов через их концентрацию, давления и магнитное поле, а также формула для относительного вклада электронов в полный ток. Доказывается равенство нулю электронного тока в случае изотропного давления электронов. Из уравнения силового баланса для пространственно одномерного токового слоя выводятся условия силового баланса в форме закона сохранения.

В разделе III.3 рассматривается общий вид функции распределения замагниченных электронов в стационарном пространственно одномерном токовом слое как приближенного решения уравнения Власова в дрейфовом приближении в форме функции двух приближенных интегралов движения — магнитного момента и гамильтониана. 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. Также рассматривается частный случай решения в виде распределения Максвелла–Больцмана.

В разделе III.4 изложена формулировка системы уравнений и граничные условия модели, а также схема итерационного процесса численного решения уравнений этой модели.

В разделе III.5 приведено заключение к третьей главе.

В главе IV рассматривается моделирование плоского симметричного тонкого токового слоя без сдвиговой компоненты магнитного поля.

В разделе IV.1 изложено введение этой главы. В разделе IV.2 изложена постановка задачи.

В разделе IV.3 изложены результаты моделирования тонкого токового слоя с изотропным давлением электронов, которые образованы встречными потоками протонов.

В разделе IV.4 изложены результаты моделирования ТТС с изотропным давлением электронов, которые образованы встречными потоками ионов кислорода. Также рассматривается моделирование ТТС с изотропным давлением электронов, в которых присутствуют встречные потоки как ионов кислорода, так и протонов.

В разделе IV.5 изложены результаты моделирования ТТС с анизотропным давлением электронов, которые образованы либо встречными потоками протонов, либо встречными потоками ионов кислорода. В разделе IV.6 приведено заключение к четвертой главе.

В главе V рассматривается моделирование ТТС с изотропным давлением электронов при наличии сдвиговой компоненты магнитного поля. В разделе V.1 изложено введение этой главы.

В разделе V.2 изложены результаты моделирования ТТС, близких по ряду своих свойств к симметричным ТТС, рассмотренным в главе IV.

В разделе V.3 рассматриваются результаты моделирования ТТС с колоколообразным профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией. В разделе V.4 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.

### **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 24 научных статьях 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, практическая значимость и ценность результатов исследования**

Первым результатом является получение квазинейтрального предела системы уравнений Власова–Дарвина для задач, в которых, во-первых, в каждой точке области моделирования магнитное поле ненулевое, во-вторых, проходящая через точку силовая линия магнитного поля пересекает границу области моделирования в двух точках, и, в третьих, поля и параметры плазмы неоднородны вдоль линий магнитного поля.

Полученная система уравнений учитывает магнитоиндукционные эффекты, ионные кинетические эффекты, а также осредненные крупномасштабные электростатические эффекты, и формально использует условие квазинейтральности. В полученной системе поля определяются из системы уравнений эллиптического типа без частных производных по времени, что соответствует мгновенному дальнему действию, причем магнитное поле описывается уравнением Гаусса и уравнением Ампера.

Новизна первого результата состоит в том, что изменены уравнения для расчета крупномасштабного электрического поля. Вместо уравнения Пуассона используется уравнение продольного силового равновесия электронов. Из уравнений Фарадея и Ампера, а также обобщенного закона Ома выводится векторное эллиптическое уравнение для соленоидальной части электрического поля. Система из этих двух уравнений позволяет найти электрическое

поле в области моделирования при заданных пространственных распределениях параметров плазмы и магнитного поля, а также при заданных граничных условиях.

Практическая ценность первого результата состоит в том, что по сравнению с корректной численной моделью для системы Власова–Максвелла на основе метода частиц численная модель на основе квазинейтрального предела системы Власова–Дарвина при одинаковом числе узлов пространственной сетки и одинаковом числе шагов по времени позволяет иметь на 2–3 порядка больший размер области расчетов, а также получить на 4–5 порядков большее время, на которое рассчитывается поведение системы.

Вторым результатом является получение дивергентной формы векторного уравнения силового баланса в электронейтральной плазме. В этом уравнении исключены электрическое поле и плотности тока компонент плазмы, точное измерение которых на космических аппаратах является очень сложной задачей. В правой части этого уравнения под знаком дивергенции фигурирует магнитное поле и сумма тензоров напряжений всех компонент плазмы, которые лучше поддаются измерению и теоретическим оценкам. Для стационарного пространственно одномерного токового слоя из этого уравнения получено векторное условие силового баланса в форме закона сохранения, из которого вытекают условия силового баланса по осям системы координат.

Практическая ценность второго результата состоит в следующем. Полученная дивергентная форма уравнения силового баланса необходима для постановки граничных условий в численных моделях, а также полезна для интерпретации данных измерений на космических аппаратах. Вытекающее из этого уравнения в пространственно одномерном случае условие силового баланса в форме закона сохранения необходимо для создания численных моделей ТТС и особенно важную роль играет в несимметричных случаях. Это условие применяется для постановки граничных условий и в ходе численного решения уравнений модели обеспечивает сходимость итерационного процесса к стационарному решению. Погрешность выполнения этого условия показывает точность численного решения.

Третьим результатом работы является разработанная автором кинетическая численная модель пространственно одномерного тонкого токового слоя (ТТС) с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме с замагниченными электронами, который образован встречными продольными потоками незамагниченных ионов.

Новизна и практическая ценность этой модели состоят в следующем. Созданная модель по сравнению с другими моделями ТТС имеет лучшие точность, быстродействие и адаптивность, а также более широкую область применимости. Модель позволяет исследовать симметричные и несимметричные конфигурации ТТС без сдвиговой компоненты магнитного поля с учетом анизотропии давления электронов, а также несимметричные конфигурации со сдвиговой компонентой магнитного поля в случае изотропного давления электронов. Это позволило выполнить моделирование ряда задач, недоступных другим моделям.

В модели используется ряд новых приемов, которые на порядки увеличивает быстродействие модели и позволяет на мощном персональном компьютере с двумя современными графическими процессорами решать задачи, для которых в случае использования метода частиц потребовались бы многодневные расчеты на мощном кластерном суперкомпьютере.

Четвертый результат работы состоит в получении с помощью модели большого числа стационарных конфигураций ТТС в ближнем хвосте магнитосферы Земли и исследовании зависимости этих конфигураций от параметров образующих ТТС встречных продольных потоков ионов.

Новизна и практическая ценность четвертого результата состоит в следующем. Получилось оценить область значений параметров встречных продольных потоков ионов, при

которых образуется конфигурации ТТС, согласующиеся с наблюдаемыми по спутниковым измерениям профилями ТТС ближнего хвоста.

При этом была изучена структура функций распределения различных популяций ионов в разных частях ТТС. Это улучшило интерпретацию данных измерений на космических аппаратах. Кроме того, в работе исследовано влияние анизотропии давления замагниченных электронов на стационарную конфигурацию симметричного ТТС. Были подтверждены и уточнены результаты аналитической модели ТТС.

Пятый результат работы заключается в том, что моделирование показало возможность образования ТТС в ближнем хвосте магнитосферы Земли потоками ионов кислорода ионосферного происхождения в случаях, когда либо потоками протонов можно пренебречь, либо эти потоки относительно слабые и дают меньший вклад в полный ток. Такие условия реализуются в ионосфере и магнитосфере Земли в периоды повышенной геомагнитной активности.

Новизна пятого результата заключается в следующем. Показано, что на предварительной фазе суббури в геомагнитно активных условиях наблюдаемые в последних данных спутниковых измерений параметры продольных потоков ионов кислорода в плазменном слое ближней магнитосферы вполне достаточны для образования ТТС в ближнем хвосте только за счет этих потоков. В более раннем моделировании с помощью аналитической модели такая область значений входных параметров не исследовалась.

Практическая ценность пятого результата состоит в том, что получены важные особенности профилей ТТС, образованных потоками ионов кислорода, которые дают соображения для целенаправленного системного анализа данных спутниковых измерений.

Шестой результат и его новизна состоят в том, что впервые с помощью численного моделирования были получены два типа конфигураций ТТС с самосогласованной сдвиговой (шировой) компонентой магнитного поля и исследована их зависимость от наличия и величины внешней постоянной сдвиговой (шировой) компоненты магнитного поля. Конфигурации первого типа по форме профилей близки к симметричным, в них ТС относительно узкий, а сдвиговая компонента магнитного поля проходит через нуль вблизи центра ТС. В конфигурациях второго типа ТС примерно в два раза шире, сдвиговая компонента магнитного поля имеет колоколообразный профиль, а величина магнитного поля и концентрация в ТС примерно постоянны, то есть магнитное поле в ТС поворачивается с сохранением своей величины, что соответствует вращательному разрыву.

Практическая ценность шестого результата заключается в том, что выявлено влияние сдвиговой компоненты магнитного поля на профили ТТС и функцию распределения ионов в разных участках слоя. Это позволяет лучше интерпретировать данные спутниковых измерений.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Получен квазинейтральный предел системы уравнений Власова--Дарвина, который позволяет моделировать относительно медленную безызлучательную эволюцию тонкого токового слоя в бесстолкновительной космической плазме с наименьшим расходом вычислительных ресурсов.
2. Создана новая численная модель стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя с нормальной компонентой магнитного поля и замагниченными электронами, который образуют встречные потоки незамагниченных ионов. Эта модель по сравнению с другими моделями ТТС имеет лучшие точность, быстрдействие и адаптивность, а также более широкую область применимости.
3. С помощью новой модели получены симметричные конфигурации тонкого токового слоя

ближнего хвоста магнитосферы Земли для широкого набора параметров образующих токовый слой встречных потоков ионов и исследована зависимость конфигурации токового слоя от этих параметров. Получено влияние анизотропии давления электронов на профиль плотности тока.

4. Показано, что токовый слой ближнего хвоста магнитосферы Земли может быть образован встречными потоками либо горячих магнитосферных протонов, либо более холодных ионов кислорода ионосферного происхождения, которые имеют достаточно большую продольную скорость от 200–250 км/с и выше. При этом токовый слой, в котором основную часть полного тока через слой дают потоки ионов кислорода, примерно в 1.5–2 раза шире слоя, образованного потоками протонов.
5. Получены конфигурации тонкого токового слоя ближнего хвоста магнитосферы с колоколообразным профилем сдвиговой компоненты магнитного поля и примерно постоянными величиной магнитного поля и концентрацией ионов. 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.

### **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 24 статьях 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 // 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, 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) *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, стр. 837–849.
- 17) *О.В. Мингалев, И.В. Мингалев, 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) *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, стр. 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, стр. 769–790.
- 20) О.В. Мингалев, О В. Хабарова, Х В. Малова, И В. Мингалев, 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) 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.
- 22) Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Мерзлый А.М. Силовой баланс в токовых слоях в бесстолкновительной плазме // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 2. С. 3–12. DOI: 10.12737/szf-71202101.
- 23) Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Мерзлый А.М., Зелёный Л.М. Роль ионов кислорода в структуре токового слоя ближнего хвоста магнитосферы Земли // Физика плазмы. 2022. Т. 48, № 3, С. 237–258.
- 24) Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Артемьев А.В., Зелёный Л.М. . Возможность образования токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы потоками ионов кислорода // Известия РАН. Серия физическая. 2022, том 86, № 3, С. 316–321.

#### **Другие публикации автора**

Имеется ещё более 35 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.