

«УТВЕРЖДАЮ»
проректор
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова
профессор А.А. Федянин



июня 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университета имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Мингалев Олега Викторовича
«Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме и численное моделирование тонких токовых слоев»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.03 — Физика Солнца

Диссертация О. В. Мингалев посвящена изучению тонких токовых слоев в космической плазме и разработке систем уравнений для моделирования крупномасштабных медленных процессов, протекающих в ионосфере, магнитосфере и солнечном ветре и имеющих пространственный и временной масштабы, превышающие дебаевский радиус и период плазменных колебаний электронов, соответственно. На основе разработанных количественных подходов к описанию крупномасштабных процессов в магнитосфере Земли выполнено численное моделирование стационарных тонких токовых слоев в геомагнитном хвосте.

Распределение электромагнитных полей и плазмы в околоземном космическом пространстве определяется структурой крупномасштабных магнитосферно-ионосферных токов и является сложной самосогласованной системой. На фоне глобального распределения полей и плазмы обычно протекают относительно мелкомасштабные и быстрые процессы, приводящие к формированию тонких токовых слоев. **Актуальность работы** обусловлена необходимостью создания реалистичных численных самосогласованных моделей крупномасштабного распределения электромагнитного поля и плазмы в тонком токовом слое геомагнитного хвоста, позволяющих дать надежную интерпретацию данных наблюдений на космических аппаратах.

Основной теоретической проблемой, препятствующей созданию глобальных самосогласованных численных моделей космической плазмы является сложность физически корректного описания электрического поля. Следует отметить, что в течение последних десятилетий большое количество работ было посвящено созданию глобальных численных моделей ионосферы и магнитосферы Земли, однако эти модели еще очень далеки от приемлемого уровня реалистичности. Для моделирования процессов в магнитосфере необходимы полностью самосогласованные модели, в которых магнитное и электрическое поле выводятся по рассчитанным в модели распределениям параметров

плазмы. Описанная выше космофизическая проблема детально рассмотрена и решена О.В. Мингалевым в его диссертационной работе.

Главными теоретическими результатами, полученными в диссертации, являются разработка модифицированной системы уравнений Власова-Дарвина для плазмы в приближении квазинейтральности. В полученной системе уравнений магнитное поле определяется уравнениями Гаусса и Ампера. Для соленоидальной части электрического поля применено векторное уравнение Пуассона. Потенциальная часть электрического поля определяется условием квазинейтральности и условием силового равновесия электронов вдоль силовых линий магнитного поля.

Полученная система уравнений для полей замыкается системой уравнений переноса плазмы. Показано, что при любом виде уравнений переноса плазмы для определения полей можно получить систему уравнений эллиптического типа, не содержащую частных производных по времени и определяющую электромагнитное поле в области моделирования в соответствии с граничными условиями и текущим пространственным распределением гидродинамических параметров плазмы. В итоге, автором разработана численная кинетическая модель тонкого токового слоя с нормальной компонентой магнитного поля, обладающая высокой точностью и быстродействием. На основе модели построено большое число конфигураций токового слоя в ближнем хвосте магнитосферы, в том числе, с учетом потоков ионов кислорода ионосферного происхождения.

В работе рассмотрены применения полученной системы уравнений для моделирования стационарных тонких токовых слоев с нормальной компонентой магнитного поля, примерами которых являются токовые слои на магнитопаузе и в хвосте магнитосферы Земли и Юпитера, а также, гелиосферный токовый слой.

Оценка содержания работы и ее завершенности. Диссертация содержит 165 страниц текста, включая 24 рисунка. Результаты отражены в 24 научных статьях, которые опубликованы в рецензируемых зарубежных и отечественных научных журналах, входящих в список ВАК. Автором сформулированы пять основных результатов, которые выносятся на защиту. Диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения, заключения и списка литературы из 210 наименования.

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

В **главе I** выполнен анализ условий для правильного воспроизведения в моделировании электростатических эффектов в рамках исходной системы уравнений Власова-Максвелла. Рассмотрен общий вывод модифицированной системы уравнений для плазмы в приближении квазинейтральности. Детально представлена методика замыкания этой системы уравнений одной из систем уравнений переноса плазмы, а также рассматривается замыкание в случае, когда системой уравнений переноса являются уравнения Власова для каждой компоненты плазмы.

В **главе II** рассматривается система уравнений Власова в случае наличия замагниченных компонент. Рассматриваются условия замагниченности и их следствия. Показано, что из замагниченности любой ионной компоненты околоземной плазмы следует замагниченность электронов, из которой следует безызлучательность системы (приближение с учетом пренебрежимо малого тока смещения) и выполнение в ней условий квазинейтральности и силового равновесия электронов вдоль магнитного поля. Получены выражения для ортогонального магнитному полю компоненты плотности тока

замагниченной плазмы, а также уравнение потока импульса для замагниченных ионной и электронной компонент.

Рассмотрено уравнение Власова в дрейфовом приближении для произвольной замагниченной компоненты. Приведена система уравнений Власова с учетом силового равновесия электронов вдоль магнитного поля для плазмы, состоящей из незамагниченных ионов и замагниченных электронов, а также рассматриваются основные детали схемы численного интегрирования по времени этой системы уравнений. Построена система уравнений Власова в дрейфовом приближении в случае полностью замагниченной плазмы. Изложена схема численного интегрирования по времени этой системы уравнений. В конце главы рассматривается система уравнений Власова в случае замагниченных электронов и частично-замагниченных ионов.

Глава III посвящена построению модели двухмерного стационарного токового слоя в плазме, состоящей из незамагниченных протонов и замагниченных электронов, где магнитное поле и электрическое поле ортогональны току и имеют ненулевую нормальную компоненту. Получен общий вид функции распределения ведущих центров замагниченных электронов в рассматриваемой токовой конфигурации. Показано, что в данном случае система уравнений движения ведущего центра для электронов является четырехмерной. В ней имеется три независимых точных интеграла движения частиц: магнитный момент, гамильтониан и единственная компонента векторного потенциала, то есть система уравнений полностью интегрируется, а функция распределения ведущих центров замагниченных электронов является функцией трех перечисленных интегралов. Показано, что если в центре слоя величина магнитного поля меньше, чем на его границах, то обязательно присутствует популяция захваченных электронов, которая необходима для обеспечения электронейтральности.

Представлена формулировка системы уравнений и граничные условия модели стационарного двухмерного токового слоя, предложена схема итерационного процесса численного решения уравнений этой модели. Выведено векторное уравнение силового баланса в виде закона сохранения для одномерного токового слоя.

В главе IV описана разработанная О.В. Мингалевым численная модель стационарного пространственно одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме с заданной нормальной компонентой магнитного поля и с замагниченными электронами, имеющими распределение Максвелла—Больцмана. Токовый слой образован падающими вдоль силовых линий магнитного поля встречными потоками незамагниченных горячих протонов. Показано, что в случае изотропного распределения электронов их ток равен нулю.

В главе детально исследована система уравнений и граничных условий модели пространственно одномерного тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме с заданной нормальной компонентой магнитного поля и замагниченными электронами, распределенными по закону Максвелла-Больцмана, для двух магнитных конфигураций. Выполненные расчеты позволили выполнить оценку параметров встречных потоков ионов, при которых может формироваться тонкий токовый слой в геомагнитном хвосте при суббуревой активности.

В главе V представлены результаты моделирования тонких токовых слоев при наличии сдвиговой компоненты магнитного поля. Приводятся детали численного решения данной модели. Представлены результаты самосогласованного моделирования тонкого токового слоя. Показано, что наличие сдвиговой компоненты нарушает симметрию и меняет пространственные параметры токового слоя.

В **Приложении** изложены новые методы численного решения стационарного уравнения Власова.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы и результаты, которые выносятся на защиту.

Научная новизна и практическая ценность. В настоящей работе впервые сформулирован подход к решению важнейшей для прикладных целей теоретической проблемы описания тонких токовых слоев в околоземной космической плазме в приближении квазинейтральности. Предложен новый метод определения электрического поля из условия силового равновесия электронов вдоль магнитного поля.

В диссертации получены важные новые результаты в области исследования структуры стационарных тонких токовых слоев с нормальной компонентой магнитного поля в бесстолкновительной плазме из незамагниченных протонов и замагниченных электронов. Предложено кинетическое описание замагниченных электронов в рамках уравнения Власова в дрейфовом приближении и получен общий вид функции распределения ведущих центров электронов как функции трех интегралов системы уравнений движения их ведущего центра. Построена теория стационарных, одномерных тонких токовых слоев с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля, с учетом электростатических эффектов и кинетическим описанием замагниченных электронов функцией распределения Максвелла-Больцмана. Получен набор конфигураций тонкого токового слоя, для которых с высокой точностью выполнены условия силового баланса. 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. Эти результаты имеют несомненную практическую ценность, поскольку они позволяют дать надежную интерпретацию данных наблюдений токовых слоев на космических аппаратах.

В рамках разработанного теоретического подхода получены численные решения и детально исследованы конфигурации тонкого токового слоя с "колоколообразным" профилем сдвиговой магнитной компоненты и постоянными величинами магнитного поля и концентрации плазмы. Конфигурации такого типа часто наблюдаются космическими аппаратами в хвосте магнитосферы Земли.

Полученные в области моделирования токовых слоев результаты подтверждают правильность и эффективность разработанного подхода с определением потенциальной части электрического поля из условия силового равновесия электронов вдоль линий магнитного поля и условия квазинейтральности.

Практическая ценность диссертации заключается, прежде всего, в возможности использования численных моделей, разработанных автором, для решения широкого круга фундаментальных задач в области космической физики, а также, для систем анализа и прогнозирования космической погоды.

Обоснованность результатов работы и основных положений, выносимых на защиту, сомнений не вызывает. Автор использует гибкие и разнообразные подходы к выводу систем уравнений для описания низкочастотных полей в околоземной космической плазме. Математические выкладки, преобразования и оценки выполнены безукоризненно. Результаты работ О.В. Мингалева отражены в 24 статьях в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в список ВАК; они докладывались автором диссертации на ежегодных отечественных конференциях "Физика плазмы в солнечной системе" в 2006-2022 гг., были представлены на научных ассамблеях Европейского геофизического союза (EGU, Вена, Австрия) и COSPAR.

Диссертация написана живым и понятным языком на высоком профессиональном уровне. Существенных замечаний к результатам выполненных работ и содержанию диссертации не имеется. Обнаруженные недостатки скорее относятся к интерпретации полученных результатов и сферы их использования.

1. Стр. 25, 3 абзац снизу. Непонятно сравнение толщины магнитопаузы с гирорадиусом тепловых протонов. Более уместно сравнить с ларморовским радиусом протонов солнечного ветра (0.1-1 кэВ). При этом получаются значения, в большей мере, соответствующие наблюдениям. Ссылки на работы, в которых даются оценки толщины магнитопаузы, не совсем корректны. Приведенные работы посвящены, главным образом, токовому слою хвоста магнитосферы.
2. С.34, второй абзац сверху. Автор получает оценки для безразмерного параметра $(\lambda_D/L_f)^2$, характеризующего допустимые погрешности при численном решении системы уравнений Власова-Максвелла (1.1 – 1.7), здесь λ_D – Дебаевский радиус, L_f – характерный масштаб изменения электромагнитного поля. Утверждается, что параметр мал, и что полученная автором оценка справедлива для плазмы солнечного ветра, магнитосферы и ионосферы. Вызывает сомнение, что параметр $(\lambda_D/L_f)^2$ имеет близкие значения во всей магнитосфере и в ионосфере. В частности, дебаевский радиус в отдельных областях магнитосферы и в ионосфере различается на несколько порядков.
3. На странице 51 (второй абзац) автор называет типичные значения магнитосферных протонов (несколько кэВ). В то же время, в магнитосфере существуют области, как с более холодной, так и с более горячей плазмой.
По-видимому, речь идет не о всей магнитосфере, а об отдельных ее областях.
Хотелось бы, чтобы автор уточнил, какие плазменные регионы в магнитосфере (плазменный слой хвоста?) имеются в виду.
4. Очень много внимания уделяется методам численного решения уравнений, оценкам погрешностей и обсуждению необходимых вычислительных ресурсов (например, сс.34-36, 50), что кажется избыточным в квалификационной работе на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности «Физика Солнца». Более уместным было бы разместить описания численных методов и алгоритмов в специальном приложении.
5. Стр. 51. Во втором абзаце снизу упоминаются токовые слои, образованные потоками высокоэнергичных протонов солнечных космических лучей. Непонятно, о частицах каких энергий идет речь. В целом, вызывает сомнение необходимость упоминания этого явления в работе, связанной с исследованием токовых слоев.
6. Имеется небольшое количество опечаток: с.24 («гелеогеофизических», 3 строка); с.38 («определяются определяются», 10 строка); с.26 («носитель» – лишнее слово, 5 строка); с.51 («КэВ», 16 строка снизу); с.164 («получена дивергентная формы», п.2)

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация О.В.Мингалева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основе выполненных автором теоретических разработок построены системы уравнений для моделирования крупномасштабных процессов, протекающих в околоземной космической плазме. Результаты работы О.В.Мингалева могут быть использованы в научных организациях, ведущих работы по физике космической плазмы: ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ, ПГИ, ИПФ, ИЗМИРАН, СПбГУ, МФТИ, ФИАН, ГАИШ, ИСЗФ СО РАН.

Таким образом, диссертация О.В. Мингалева «Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме и численное моделирование тонких токовых слоев» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 год № 335, а сам Мингалева Олег Викторович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Отзыв составил

Заведующий Отделом космических наук НИИЯФ МГУ,
д.ф.-м.н.



/Калегаев В. В./

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании семинара НИИЯФ МГУ: «Астрофизика космических лучей и физика космоса» (руководитель семинара д.ф.м.н., В.В. Калегаев) 18 мая 2022 г.

Директор НИИЯФ МГУ
профессор, член-корр. РАН



/Боос Э.Э./