

## Отзыв

официального оппонента профессора Владимира Семёновича Семенова на диссертацию **Олега Викторовича Мингалёва «Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме и численное моделирование тонких токовых слоев»** на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Физика Солнца.

Согласно данным НАСА, а также американского метеорологического агентства NOAA, примерно два с половиной года назад (в декабре 2019 года) начался новый 25 солнечный цикл. Вопреки ожиданиям начало этого цикла оказалось довольно резвым, по солнечным пятнам 25 цикл уже опережает предыдущий 24 на 18 месяцев. В связи с этим значительно возрос интерес к проблемам космической погоды, физике Солнца и солнечного ветра, процессам формирования и распада космических токовых слоев. Поэтому выбранная О. В. Мингалёвым тема диссертации представляется важной и актуальной.

Заявленной целью диссертационной работы О. В. Мингалёва является создание численной самосогласованной модели тонких токовых слоев в космической плазме и на ее основе провести моделирование квазистационарной эволюции токового слоя в хвосте магнитосферы Земли.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключение, Приложения и списка литературы из 210 наименований, содержит 165 страниц текста с 25 рисунками.

Во Введении содержатся необходимые для диссертационной работы сведения – обоснована актуальность темы, обсуждена степень ее разработанности, приведены оценки, иллюстрирующие необходимость разработки новых методов кинетического моделирования космической плазмы, сформулированы цели работы, отмечены новизна и практическая ценность полученных результатов.

Глава 1 посвящена выводу системы уравнений Власова-Дарвина с использованием условий квазинейтральности. Полученная система уравнений (1.45 – 1.52) является более простой по сравнению с исходной системой Власова, в ней пренебрегается токами смещения. С математической точки зрения это означает, что в отличие от гиперболической системы Власова полученная система уравнений становится эллиптической, в ней электромагнитное поле распространяется с бесконечной скоростью. Это позволяет снять ограничения, которые накладывались условием Куранта на шаги по времени и пространству. В работе показано, что выигрыш перехода от системы Власова к уравнениям Власова Дарвина с учетом квазинейтральности достаточно большой. В частности, расчетная область может быть увеличена в 100 и более раз, а расчетное время возрастает даже больше – на 4-5 порядков, что очень важно для кинетического моделирования процессов в космической плазме, например, таких как взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли.

В Главе II проводятся дальнейшие упрощения. Дело в том, что при расчете траектории заряженной частицы в магнитном поле львиная доля вычислительных ресурсов расходуется на ларморовское вращение. Усреднение уравнений движения по гирофазе позволяет получить значительный выигрыш: скажем, количество гидродинамических переменных уменьшается с 10 до 4.

В работе Мингалева рассмотрены следующие три варианта: 1) замагничены только электроны, 2) замагничены все компоненты плазмы, 3) замагничены электроны и часть ионных компонент. В соответствии с этим планом в следующих параграфах последовательно выведены системы уравнений для всех трех поставленных задач, что удобно для пользователей, так как позволяет максимально использовать возникающую в приложениях специфику задач.

В этой же главе выведены уравнения силового баланса (II.88, II.89) и их редукция для случая замагниченных электронов (II.90, II.91), которые полезны для корректного определения граничных условий.

Следующие три главы посвящены разработке теории тонких квазистационарных токовых слоев с пролетными пучками ионов.

В Главе III рассмотрена модель стационарного тонкого токового слоя с заданной нормальной компонентой магнитного поля и сдвиговым магнитным полем на основе выведенных в первых двух главах уравнений. Главной отличительной чертой полученного в диссертации О.В.Мингалева семейства решений для токовых слоев являются встречные пучки ионов, движущиеся вдоль магнитных силовых линий. В Главе III последовательно строятся решения следующих задач.

1. Простейший случай симметричного токового слоя, но с учетом анизотропии давления электронов.
2. Симметричный токовый слой со сдвиговой компонентой магнитного поля.
3. Токовый слой со сдвиговой компонентой магнитного поля, которая равна нулю в одной точке внутри слоя.
4. Токовый слой со сдвиговой колоколообразной компонентой магнитного поля.

Тем самым проведено исследование токовых слоев со встречными пучками протонов при различных граничных условиях и различных входных параметрах.

Следующая Глава IV посвящена исследованию роли встречных пучков ионов на свойства образующихся токовых слоев. Была проведена серия расчетов, показывающих как токовый слой зависит от температуры и гидродинамической скорости встречных пучков. Оказалось, например, что для самой малой рассмотренной температуры пучка 4 кэВ скачок магнитного поля поперек слоя 40 нТ достигается при скорости пучка 620 км/с, а для более высокой температуры 10 кэВ тот же скачок магнитного поля, который характеризует ток в слое, скорость пучка заметно уменьшается до примерно 500 км/с. Для

потоков ионов кислорода с температурой 0,4 кэВ потоковая скорость пучка оказывается равной 200 км/с.

Наконец, в последней Главе V были изучены два типа конфигураций токовых слоев с самосогласованной сдвиговой компонентой магнитного поля. При нечетном изменении сдвиговой компоненты в слое токовый слой оказывается узким, профили близки к симметричным. В конфигурациях второго типа с четным колоколообразным изменением сдвиговой компоненты слой становится примерно в два раза шире, причем модуль магнитного поля и концентрация плазмы становятся почти постоянными.

В Приложении приведены два новых метода численного решения стационарного уравнения Власова.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

К числу наиболее значимых новых результатов, представленных в диссертации О. В. Мингалева, можно отнести:

1. Выведена и исследована система уравнений Власова-Дарвина, в которой пренебрегается током смещения и существенно используется условие квазинейтральности. При этом электромагнитное поле определяется из уравнений эллиптического типа, что соответствует мгновенному дальнему действию. Такая система уравнений более проста по сравнению с уравнениями Власова-Максвелла и для стационарных задач в принципе может сэкономить значительные вычислительные ресурсы.
2. Проведено дальнейшее упрощение системы уравнений Власова-Дарвина с учетом возможной замагниченности заряженных частиц. В работе Мингалева рассмотрены следующие три варианта: 1) замагничены только электроны, 2) замагничены все компоненты плазмы, 3) замагничены электроны и часть ионных компонент. Для каждого из этих вариантов выведены соответствующие системы уравнений, что удобно для пользователей, так как позволяет максимально использовать возникающую в приложениях специфику задач. Отдельного упоминания заслуживают полученные уравнения силового баланса (II.88, II.89) и их редукция для случая замагниченных электронов (II.90, II.91), которые полезны для корректного определения граничных условий.
3. Получено новое семейство кинетических решений для одномерных квазистационарных токовых слоев со встречными пучками ионов вдоль магнитных силовых линий. Проведено параметрическое исследование этих решений, выявлены те диапазоны изменения входных параметров, которые соответствуют тонким токовым слоям.
4. Показано, что токовый слой ближнего хвоста магнитосферы Земли может быть образован потоками ионов кислорода ионосферного происхождения, которые должны иметь достаточно большую продольную скорость порядка 200 км/с.

Работа не лишена недостатков.

1. В работе О.В.Мингалева утверждается (см. с.49), что выведенные автором уравнения Власова-Дарвина позволят более точно и быстро решать задачи моделирования токовых слоев в космической плазме. При этом расчетную область можно увеличить на 2-3 порядка, а расчетное время даже на 4-5 порядков. Раз метод так хорош, казалось бы, надо было продемонстрировать его преимущества на примере решения многомерных задач, хотя бы простых. Тем не менее все расчеты в диссертации ограничились лишь одномерными задачами, на которых преимущества нового подхода заметить трудно.
2. В диссертации О.В.Мингалева, посвященной токовым слоям, ни разу не употребляется термин «пересоединение». Это выглядит странно, поскольку все самые успешные миссии последних десятилетий – THEMIS, Cluster, MMS- были сконцентрированы на исследовании процесса магнитного пересоединения в магнитосферных токовых слоях. Между тем, по крайней мере, две работы по пересоединению имеют непосредственное отношение к рассмотренной в диссертации тематике. Это прежде всего работа T.W.Hill, *Magnetic merging in a collisionless plasma*, *J.Geophys.Res.*, 1975, v.70, pp.4689-4697. В ней впервые было показано, что два встречных пучка протонов, движущихся вдоль магнитной силовой линии с альфвеновскими скоростями, создают в центре токового слоя такую центробежную силу, которая в точности компенсирует натяжение магнитного поля, что и приводит к формированию тонкого токового слоя. Вторая работа Cowley, S.W.H., *The causes of convection in the Earth's magnetosphere: a review of developments during the IMS*, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 531, 1982. В ней показано, что магнитное пересоединение естественным образом приводит к появлению двух встречных пучков протонов. Чтобы их увидеть, надо перейти в систему отсчета деХофмана-Теллера, движущуюся вдоль токового слоя со скоростью электродрейфа. В этой системе отсчета токовый слой квазистационарен, и появляются два встречных пучка протонов, движущихся вдоль магнитной силовой линии с альфвеновскими скоростями. Это именно те условия, которые необходимы для применения решений Мингалева. Поэтому я полагаю, что основное приложение решений Мингалева это вовсе не спокойные токовые слои, обсуждаемые в диссертации, а динамические токовые слои после пересоединения. Для них есть внятный ответ на вопрос о том, откуда берутся необходимые для токовых слоев Мингалева два встречных пучка протонов.

Эти замечания не умаляют общей высокой оценки работы О. В. Мингалева, которая содержит большое количество новых, интересных результатов уже заслуживших международное признание.

Новизна и научная значимость диссертационной работы О. В. Мингалева не вызывают сомнений. Основные результаты многократно доложены на российских и международных конференциях и достаточно полно отражены в 24 публикациях в научных журналах из списка ВАК. Результаты работы Олега Викторовича могут быть использованы в научных учреждениях, занимающихся космической физикой: ИКИ, НИЯФ МГУ, СПбГУ, ПГИ, ИЗМИРАН, СиБизМИР и др.

Основные результаты диссертации были доложены О. В. Мингалевым на семинаре кафедры физики Земли физического факультета СПбГУ 17.05.2022. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертационная работа О. В. Мингалева «**Описание крупномасштабных процессов в бесстолкновительной космической плазме и численное моделирование тонких токовых слоев**» удовлетворяет всем требованиям ВАК для докторских диссертаций, а ее автор О. В. Мингалев заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.03 физика Солнца.

профессор

В. С. Семенов

физического факультета СПбГУ

09.06.2022

Петергоф, ул. Ульяновская 1, 198504

тел. 8 812 428 4627

e-mail: v.s.semenov@spbu.ru



Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей

Текст документа размещен  
в открытом доступе  
на сайте СПбГУ по адресу  
<http://spbu.ru/science/expert.html>