

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Магнитные и электрические квазистационарные локализованные структуры  
в анизотропной бесстолкновительной плазме»**

**Аспирант:** Нечаев Антон Андреевич

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

Кочаровский Владимир Владиленович,  
д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН,  
зав. отд. 130 ИПФ РАН

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.08 Физика плазмы

**Форма обучения:** очная

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Хорошо известно, что магнитные и электрические квазистационарные самосогласованные структуры в бесстолкновительной неравновесной плазме в существенной мере определяют ее динамику и кинетику происходящих в ней явлений. В последнее время это круг вопросов привлекает все большее внимание, особенно благодаря вновь появляющимся возможностям их экспериментального исследования и численного моделирования. В настоящей диссертации рассматривается ряд таких задач, представляющих интерес как для фундаментальной физики плазмы, так и для различных приложений в астрофизической и лазерной плазме.

Одной из них является задача о расширении плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму, сопровождающемся образованием тех или иных структур в области фронта ударной волны (см., например, [1–8]). В частности, открытыми остаются вопросы о возможности и условиях образования скачка плотности плазмы, его зависимости от свойств фоновой плазмы и профиля неоднородности разогретой плазмы, наличии и проявлениях многопоточности ионов, условиях генерации и пространственной структуре сильного магнитного поля.

Совершенно не изученными являются свойства вейбелевской неустойчивости и формируемой ей квазимагнитостатической турбулентности, возникающих в двухкомпонентной плазме со сравнимыми по величине энергосодержанием и степенью анизотропии электронов и ионов. Вместе с тем подобная ситуация вполне реализуема в лазерной плазме, создаваемой абляцией вещества короткими мощными импульсами, и при контакте звездного (солнечного) ветра с различными магнитоплазменными образованиями, например магнитосферами планет, магнитными облаками или корональными арками (см., в частности, [9–17]).

Значительная часть теоретических исследований квазистационарных токовых слоев, являющихся важнейшими структурными элементами в бесстолкновительной плазме магнитосфер планет и звезд, опирается на плоские конфигурации силовых линий магнитного поля, магнитогидродинамическое приближение и максвелловские распределения частиц по скоростям (например, [18–36]). В то же время многочисленные экспериментальные исследования этих структур в лабораторной и космической плазме требуют выхода за рамки указанных приближений и построения теории токовых слоев с широкими силовыми линиями магнитного поля, учет конечной толщины переходных слоев в плазме и немаксвелловского распределения частиц.

Ключевые задачи настоящей работы по существу диктуются логикой систематического анализа сложной картины указанных физических процессов, построение которой ведет к важным результатам фундаментального и прикладного характера в различных областях физики космической и лабораторной плазмы.

## Цели работы

Общей целью диссертационной работы является аналитическое и численное исследование ряда актуальных магнитных и электрических структур в анизотропной бесстолкновительной плазме и особенностей связанных с ними кинетических эффектов. Конкретными целями работы служат следующие.

1. Исследование условий формирования и свойств слоя уплотнения в электростатической ударной волне, образующейся при расширении горячей плазмы в разреженную и холодную фоновую плазму.
2. Анализ кинетических и динамических свойств квазимагнитостатической турбулентности, вызванной одно- или двухкомпонентной вейбелевской неустойчивостью в неоднородно расширяющейся или однородной неравновесной плазме.
3. Разработка моделей токовых слоев с широким силовым линиям самосогласованного магнитного поля в бесстолкновительной плазме.
4. Построение локализованных токовых слоев в плазме с обрезанными максвелловскими распределениями частиц, описывающих распределенную границу между областями однородной плазмы с различными параметрами и заданными внешними полями.

### **Методы исследования**

Основным методом исследования является аналитическое и численное решение самосогласованных уравнений Власова – Максвелла с граничными и начальными условиями, отвечающим поставленным физическим задачам. Анализ различных полученных решений производился с использованием теории возмущений для кинетического уравнения, метода дисперсионных уравнений, метода спектральной динамики, параметрического представления функций, усреднения по углу и других методов современной теоретической физики.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе впервые, на основе численного моделирования методом частиц в ячейках расширения бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную разреженную плазму, выяснены условия возникновения и характер эволюции слоя уплотнения на фронте электростатической ударной волны для большого числа различных параметров горячей плазмы и начальных профилей ее концентрации.

Впервые найдены основные закономерности вейбелевского механизма генерации мегагауссного магнитного поля при расширении плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму, связанной с сильной анизотропией распределения неравновесных электронов под фронтом ударной волны.

Впервые, на основе численного моделирования кинетики частиц, установлены свойства двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости и нелинейной эволюции магнитного поля, имеющих место в первоначально однородной бесстолкновительной плазме со сравнимыми по величине анизотропиями и энергосодержанием электронной и ионной компонент. Показано, что индукционное электрическое поле, возникающее благодаря затуханию созданного электронами мелкомасштабного магнитного поля, формирует долгоживущие крупномасштабные токи ионов.

Разработан оригинальный класс нейтральных токовых слоев с почти произвольным широким силовым линиям магнитного поля и с варьируемыми в широких пределах импульсными и энергетическими распределениями частиц.

Развиты новые аналитические модели токовых слоев, разделяющих области нерелятивистской бесстолкновительной плазмы с отличающимися значениями параметров и внешних магнитных полей.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы определяется новыми свойствами решений уравнений Власова – Максвелла, выявленными для ряда актуальных кинетических процессов и конфигураций полей в неравновесной бесстолкновительной плазме. Подобные процессы и конфигурации характерны для лазерной и космической плазмы, и практическая значимость работы обусловлена возможностью использования полученных теоретических результатов для интерпретации данных соответствующих плазменных экспериментов и наблюдений. В частности, построенные модели токовых слоев открывают новые возможности интерпретации наблюдений долгоживущих магнитных структур в области головной ударной волны и магнитопаузы для различных конфигураций, порождаемых звёздным или солнечным ветром при обдувании магнитосфер планет (экзопланет), высоко расположенных корональных магнитных структур или магнитных облаков, контактирующих с областями слабо замагниченной плазмы и образующих магнитный переходный слой.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Расширение бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму в определенной широкой области плазменных параметров приводит к многопоточности ионов и к образованию и длительному существованию слоя уплотнения на фронте электростатической ударной волны, а также к генерации сильного неоднородного магнитного поля под фронтом этой волны за счет вейбелевской неустойчивости формирующегося анизотропного распределения электронов по скоростям.
2. Нелинейная динамика анизотропного распределения частиц и пространственного спектра магнитного поля в процессе развития двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости в первоначально однородной бесстолкновительной плазме со сравнимыми по величине анизотропиями и энергосодержанием электронной и ионной компонент определяется эстафетными процессами захвата (замагничивания) и высвобождения электронов из всё более крупномасштабных филаментов тока и диффузионного рассеяния ионов под действием квазимагнитостатической турбулентности и создаваемого ей индукционного электрического поля.
3. Существует аналитически описываемый класс кинетических равновесных переходных токовых слоев между областями бесстолкновительной плазмы с различными величинами магнитного поля, концентрации, эффективной температуры и параметров анизотропных распределений частиц, в котором эти распределения зависят только от инвариантов движения частиц (энергии и обобщенного импульса) и возможен широкий выбор пространственных профилей и величин плотности тока различных фракций частиц, а также соответствующих профилей согласованного магнитного поля, в том числе с широким его силовым линиям.

## **Достоверность результатов**

Проведенные исследования опираются на известные физические модели, широко используемые при изучении квазистационарных процессов в слабостолкновительной плазме, основанные на уравнениях Власова – Максвелла и Грэда – Шафранова, а также на ряд общетеоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование: теорию возмущений, спектральные разложения, метод усреднения по большим интервалам и другие. Полученные аналитические оценки и результаты численного моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными и теоретическими результатами других научных групп.

## **Публикации и апробация результатов**

Основные результаты работы опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах и сборниках трудов, а также докладывались на следующих конференциях, симпозиумах и научных школах:

- International Conference «Frontiers of Nonlinear Physics 2016» (Н. Новгород – С.-Петербург, 2016 г.),
- XVII и XVIII научные школы «Нелинейные волны» (Н. Новгород, 2016, 2018 г.),
- International Conference «Laser Optics» (С.-Петербург, 2016, 2018 г.),
- International Symposium «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics 2017» (Москва – С.-Петербург, 2017 г.),
- International Conference «Physics of Neutron Stars - 2017» (С.-Петербург, 2017 г.),
- «Всероссийская астрономическая конференция - 2017» (Ялта, 2017 г.),
- International Conference «Shilnikov Workshop-2018» (Н. Новгород, 2018 г.),
- международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2019» (Москва, 2019 г.),
- 24-ая Нижегородская сессия молодых ученых (Н. Новгород, 2019 г.),
- 13-ая и 14-ая конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, 2018, 2019 г.),
- 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Канадзава, Япония, 2018 г.).

Всего по теме диссертации опубликовано 4 статьи в реферируемых журналах [A1–A4], 25 статей в сборниках трудов и тезисов докладов всероссийских и международных конференций, 1 электронный препринт.

## **Личный вклад автора**

Все основные теоретические результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Постановка начальных задач для численного моделирования расширения горячей плазмы в холодную и разреженную, результаты которого представлены в первой главе и разделе 2.2 второй главы, осуществлялась автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавтора совместных работ Степанова А.Н. Расчеты методом частиц в ячейках проводились совместно с Гарасёвым М.А. Численная обработка и теоретический анализ результатов расчетов осуществлены лично автором. Численное моделирование вейбелевской неустойчивости однородной анизотропной

двухкомпонентной плазмы, результаты которого анализируются во второй главе, было выполнено сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова Бородачёвым Л.В. и Коломийцем Д.О. Количественная обработка и качественная физическая интерпретация этих расчетов выполнена автором. Аналитические модели токовых слоев, представленные в третьей и четвертой главах, построены автором лично с использованием рекомендаций научного руководителя.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 123 страницы, включая 41 рисунок. Список литературы содержит 163 наименования.

### **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, описаны методы исследования, а также научная новизна и теоретическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, изложена основная информация об апробации результатов работы.

В основу **главы 1** положен анализ целого ряда проведенных автором одномерных и двумерных расчетов методом частиц в ячейках (PIC) расширения бесстолкновительной плазмы с горячими электронами в холодную разреженную плазму, которые позволили изучить формирование и эволюцию слоя уплотнения плазмы в электростатических ударных волнах, возникающих при наличии фоновой плазмы. Ранее имелись лишь отдельные примеры подобных PIC-симуляций или же использовались гибридные коды, в которых электроны описываются гидродинамически и исследуется только кинетика ионов, что недостаточно для обнаружения ряда эффектов. Проведенное PIC-моделирование распада разнообразных разрывов плазмы дает качественное описание явления в целом (**раздел 1.2**) и выявляет основные динамические свойства слоя уплотнения плазмы в ударной волне, включая как начальную стадию его формирования (**раздел 1.3**), так и долговременную эволюцию и исчезновение (**раздел 1.4**). Особенности рассматриваемого явления в случае плавных переходов от горячей к холодной плазме обсуждаются в **разделе 1.5**.

На основе численного моделирования для большого числа различных параметров плазмы и начальных профилей ее концентрации впервые дан систематический качественный анализ условий возникновения, особенностей формирования и эволюции слоя уплотнения на фронте электростатической ударной волны, бегущей со скоростью немного больше ионно-звуковой. В результате исследования движения ионов в области слоя выяснено, что фоновая плазма играет принципиальную роль как в самом возникновении ударной волны, так и в образовании и поддержании скачка и пика плотности частиц на ее фронте. В типичных условиях большая часть ионов фоновой плазмы (до 80–90% их числа) эффективно отражается от набегающего на них фронта и в среднем приобретают скорость порядка удвоенной ионно-звуковой.

Показано также, что тонкая структура слоя уплотнения и развивающаяся ленгмюровская и ионно-звуковая турбулентность в нем связаны с проходящими через него встречными потоками ионов фоновой и основной плазмы и обусловлены воздействием потока разогретых

существенно неравновесных, немаксвелловских электронов. Выявленные основные свойства ударной волны указывают на ее отличие от простейшей ионно-звуковой ударной волны, обусловленное действием этих потоков частиц и вызванной им динамикой слоя уплотнения за ее фронтом. В частности, установлены характерные скорости направленного движения и расширения этого слоя, энергосодержание различных фракций частиц в нем и время его существования.

Результаты, представленные в этой главе, опубликованы автором в работах [A1; A5–A14].

**Глава 2** посвящена проблеме возникновения сильно неоднородного магнитного поля в условиях эффективного развития вейбелевской неустойчивости и долговременной эволюции самосогласованных токовых структур в случаях расширяющейся и первоначально однородной плазмы.

В **разделе 2.2** рассмотрены особенности динамики магнитного поля, возникающего при расширении плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму за счет вейбелевской неустойчивости анизотропного распределения неравновесных электронов по скоростям, формируемого при расширении плазмы из-за уменьшения их эффективной температуры вдоль направления разлета.

В **разделах 2.3–2.6** проведен анализ вейбелевской неустойчивости однородной плазмы и исследовано развитие вейбелевской неустойчивости в однородной плазме в ситуации, когда и электроны, и ионы в начальный момент имеют одинаковые анизотропные, бимакселловские распределения по скоростям и одинаковые температуры. Проведен анализ дисперсионных свойств двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости (**раздел 2.3**), ее насыщения и эффектов захвата электронов (**раздел 2.4**), квазибаллистического движения ионов и индукционного взаимодействия электронных и ионных токов (**раздел 2.5**), особенностей эволюции мелко-масштабных и крупномасштабных филаментов тока (**раздел 2.6**). Особое место уделено сравнительному анализу вкладов электронов и ионов в поддержание различных спектральных компонент магнитного поля и эволюция последних.

Установлены свойства двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости и нелинейной эволюции магнитного поля, имеющих место в первоначально однородной бесстолкновительной плазме с одинаковыми (сравнимыми по величине) анизотропиями и энергосодержанием электронной и ионной компонент. Показано, что индукционное электрическое поле, возникающее благодаря затуханию созданного электронами мелкомасштабного магнитного поля, формирует долгоживущие крупномасштабные токи ионов, а генерируемые ими магнитное поле создает и соответствующие крупномасштабные токи электронов. При этом после остановки роста среднеквадратичной величины полного магнитного поля экспоненциальный рост гармоник электронного и ионного токов на определенном этапе перед их насыщением сменяется на степенной и сверхэкспоненциальный соответственно, а само насыщение роста для длинноволновых гармоник происходит позднее, чем для коротковолновых. В целом динамика пространственных спектров магнитного поля в значительной мере определяется эстафетными процессами захвата (замагничивания) электронов во всё более крупномасштабные филаменты тока и совместно с диффузионным рассеянием ионов на квазимагнитостатической турбулентности приводит к универсальному степенному закону спада компонент пространственного

спектра магнитного поля (или тока) во времени с показателем, близким к  $5/2$ . При этом волновое число, отвечающее максимуму спектра магнитного поля и тока, уменьшается со временем приблизительно по корневому закону. Наконец, среднеквадратичная величина индукционного электрического поля спадает по степенному закону с показателем, близким к  $5/3$ .

Результаты, представленные в этой главе, опубликованы автором в работах [A2; A6–A9; A15–A23].

В **главе 3** разрабатывается новый обширный класс нейтральных самосогласованных магнитостатических структур с широм силовых линий, допускающий варьирование в широких пределах анизотропных распределений частиц по обобщенным импульсам и произвол в выборе распределения частиц по энергии. Этот класс строится с использованием суперпозиций токовых слоев, имеющих ортогональные магнитные поля и не обладающих широм силовых линий. Рассмотрена простая ситуация, когда функция импульсного распределения каждой фракции частиц в описываемом слое, зависящая от точных инвариантов их движения, представима в виде суммы двух цилиндрически симметричных функций с ортогональными осями.

В **разделе 3.2**, следующем работе, кратко изложен общий метод аналитического получения и классификации нейтральных стационарных токовых слоев без шира в бесстолкновительной плазме. Далее описывается способ построения структур с широм как суперпозиций слоев с взаимно перпендикулярными планарными магнитными полями, взятых так, чтобы поле одного из них было направлено вдоль плотности тока в другом. Такие суперпозиции удовлетворяют уравнению баланса давлений плазмы и магнитного поля и позволяют строить конфигурации с почти произвольным широм силовых линий.

В **разделе 3.3** рассмотрены типичные примеры и обсуждаются особенности простейших слоев с широм. **Раздел 3.4** посвящен структурам с немонотонным поворотом вектора магнитного поля и их общей классификации, основанной на выявлении смены знака этого поворота.

Разработан и проанализирован обширный класс нейтральных токовых слоев с почти произвольным широм силовых линий магнитного поля и распределениями частиц, зависящими произвольным образом от энергий и варьлируемыми в широких пределах как функции обобщенного импульса частиц. Согласно предложенной классификации, основанной на анализе направления и скорости вращения вектора магнитного поля в плоскости, перпендикулярной оси неоднородности слоя, такие слои могут обладать не только монотонным широм, но и иметь несколько точек, в которых происходит смена направления указанного вращения. Как показывают качественные оценки, данный класс самосогласованных слоев может быть применен для моделирования квазистационарных токовых структур в различных магнитосферных и астрофизических конфигурациях магнитоактивной плазмы, в том числе бессиловых, которые до сих пор оставались мало исследованными.

Результаты, представленные в этой главе, опубликованы автором в работах [A3; A4; A24–A28].

В **главе 4** развита аналитическая модель магнитостатических токовых слоев в плазме с обрезанными максвелловскими распределениями частиц при наличии внешнего магнитного поля.

Предлагаемая модель токового слоя и исходные уравнения сформулированы в **разделе 4.2**. В соответствии с общим подходом в качестве точных решений стационарных

уравнений Власова – Максвелла, описывающих структуру магнитного поля и согласованные с ним анизотропные распределения частиц по импульсам, использованы функции инвариантов движения частиц. Они взяты для каждой фракции плазмы в виде максвелловской, изотропной функции энергии частицы, умноженной на ступенчатую функцию Хевисайда, зависящую от проекции обобщенного импульса частицы на ось  $z$ , определяемую направлением тока.

**Раздел 4.3** посвящен токовым слоям, образованным одной или несколькими токонесящими фракциями заряженных частиц, которые создают электрический ток в одном и том же направлении. Сделаны оценки для реальных условий плазмы солнечного ветра.

В **разделе 4.4** приведены токовые слои со встречными токами электронов или ионов по разные стороны от центра токового слоя, в том числе слои с нулевым полным током.

Наконец, в **разделе 4.5** обсуждаются обобщения предложенной модели, например токовые слои, в которых максимумы плотностей тока разных фракций частиц сдвинуты относительно друг друга.

Построенные слои допускают многократное немонотонное изменение магнитного поля и могут иметь асимметричные, многогорбые и знакопеременные профили плотности тока. Токи различных фракций плазмы могут обладать разными масштабами и быть сдвинуты друг относительно друга в пространстве, при этом пространственные масштабы токового слоя, образованного какой-либо одной фракцией плазмы, оказываются порядка типичного гирорадиуса частиц этой фракции, а общая толщина токового слоя определяется фракцией частиц с наибольшим энергосодержанием.

Проанализированы траектории частиц, составляющих самосогласованный токовый слой, и пояснен физический смысл использования обрезанных максвелловских функций распределения для описания границы в бесстолкновительной плазме. В отличие от гидродинамических моделей такая граница не представляет собой настоящего, сингулярного разрыва, а является распределенной в пространстве: ее проницаемость для частицы в некоторой точке пространства определяется величиной импульса этой частицы. При этом ток различных фракций плазмы согласован с их дрейфом в общем магнитном поле — внешнем плюс создаваемом каждой из фракций.

Разработанная модель применима для анализа магнитостатических токовых слоев в области головной ударной волны и магнитопаузы при различных конфигурациях нерелятивистской бесстолкновительной плазмы, порождаемых звёздным или солнечным ветром при обдувании магнитосфер планет (экзопланет), высоко расположенных корональных магнитных структур или магнитных облаков, контактирующих с областями слабо замагниченной плазмы и образующих магнитный переходный слой.

Результаты, представленные в этой главе, опубликованы автором в работах [A24; A28–A30], находится в печати статья [A31].

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

## Основные результаты работы

1. С использованием численного моделирования методом частиц в ячейках процесса расширения бесстолкновительной лазерной плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму определены условия возникновения и особенности эволюции слоя уплотнения на фронте электростатической ударной волны. Показано, что длительное существование слоя уплотнения и его тонкая структура обусловлены согласованным отражением от него и прохождением сквозь него встречных потоков ионов фоновой и основной плазмы, формируемых действием потока разогретых существенно неравновесных, немаксвелловских электронов.
2. Найдены основные закономерности вейбелевского механизма генерации магнитного поля при бесстолкновительном разлете плазмы с горячими электронами в холодную фоновую плазму и установлено, что структура возникающего магнитного поля и его динамика зависят от формы начального распределения плотности горячей плазмы. Эффективность исследованного механизма связана с параметрами переходного процесса формирования сильной анизотропии электронов по скоростям под фронтом образующейся электростатической ударной волны.
3. Выявлены свойства двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости и нарастания порождаемого ей магнитного поля, происходящих в первоначально однородной бесстолкновительной плазме с одинаковыми (сравнимыми по величине) анизотропиями и энергосодержанием электронной и ионной компонент. Показано, что индукционное электрическое поле, возникающее благодаря затуханию созданного электронами мелкомасштабного магнитного поля, формирует долгоживущие крупномасштабные токи ионов и связанное с ними магнитное поле, которое в свою очередь создает соответствующие крупномасштабные токи электронов. При этом после остановки роста среднеквадратичной величины полного магнитного поля экспоненциальный рост гармоник электронного и ионного токов на определенном этапе перед их насыщением сменяется на степенной и сверхэкспоненциальный соответственно, а само насыщение роста для длинноволновых гармоник происходит позднее, чем для коротковолновых.
4. Определены законы нелинейной эволюции и затухания гармоник пространственных спектров магнитного поля и плотности тока, созданных в результате развития указанной двухкомпонентной вейбелевской неустойчивости. Показано, что они в значительной мере определяются совместным действием эстафетных процессов захвата (замагничивания) электронов во все более крупномасштабные филаменты тока диффузионного рассеяния ионов на квазимагнитостатической турбулентности, приводя к универсальному степенному закону спада компонента пространственного спектра магнитного поля (и тока) во времени с показателем, близким к  $5/2$ . При этом волновое число, отвечающее максимуму спектра магнитного поля и тока, уменьшается со временем приблизительно по корневому закону, а среднеквадратичная величина индукционного электрического поля спадает по степенному закону с показателем, близким к  $5/3$ .

5. Аналитически разработан и проанализирован обширный класс нейтральных токовых слоев с почти произвольным широм силовых линий магнитного поля и распределениями частиц, зависящими произвольным образом от энергий и варьируемыми в широких пределах как функции обобщенного импульса частиц. Согласно предложенной классификации, основанной на анализе направления и скорости вращения вектора магнитного поля в плоскости, перпендикулярной оси неоднородности слоя, такие слои могут обладать не только монотонным широм, но и включает участки с противоположным направлением указанного вращения. На основе качественных оценок показано, что данный класс самосогласованных слоев может быть применен для моделирования квазистационарных токовых структур в различных магнитосферных и астрофизических конфигурациях бесстолкновительной плазмы с широм магнитного поля, которые до сих пор оставались мало исследованными.
6. Развита аналитическая модель нейтральных токовых слоев, описывающих переход между областями с разными величинами магнитного поля, концентрации и температуры плазмы в районе головной ударной волны и магнитопаузы для различных плазменных конфигураций, порождаемых звездным или солнечным ветром при обдувании магнитосфер планет (экзопланет), высоко расположенных корональных магнитных структур или магнитных облаков, контактирующих с областями слабо замагниченной плазмы и образующих магнитный переходный слой. Построенная модель дает возможность кинетического описания тонкой структуры токовых слоев, недоступного в магнитогидродинамическом приближении, и допускает широкий выбор параметров магнитного поля и бесстолкновительной плазмы. Модель позволяет анализировать такие характеристики токовых слоев, как пространственный профиль и величина тока в них, асимметрия и многомасштабность, степень анизотропии и различие температур распределения тех или иных частиц, возможное соотношение плотности энергии частиц и плотности магнитной энергии.

## Список литературы

1. *Moiseev, S. S.* Collisionless shock waves in a plasma in a weak magnetic field / S. S. Moiseev, R. Z. Sagdeev // Journal of Nuclear Energy. Part C, Plasma Physics, Accelerators, Thermonuclear Research. 1963. Vol. 5, no. 1. P. 43–47.
2. *Krasovsky, V. L.* Electrostatic solitary waves as collective charges in a magnetospheric plasma: Physical structure and properties of Bernstein–Greene–Kruskal (BGK) solitons / V. L. Krasovsky, H. Matsumoto, Y. Omura // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2003. Vol. 108, A3. P. 1117.
3. *Balogh, A.* Physics of Collisionless Shocks: Space Plasma Shock Waves / A. Balogh, R. Treumann. New York : Springer, 2013. 500 p. (ISSI Scientific Report Series).
4. *Kato, T. N.* Electrostatic and electromagnetic instabilities associated with electrostatic shocks: Two-dimensional particle-in-cell simulation / T. N. Kato, H. Takabe // Physics of Plasmas. 2010. Vol. 17, no. 3. P. 032114.

5. Two-dimensional particle-in-cell simulation of the expansion of a plasma into a rarefied medium / G. Sarri [et al.] // *New Journal of Physics*. 2011. Vol. 13, no. 7. P. 073023.
6. Time-Resolved Characterization of the Formation of a Collisionless Shock / H. Ahmed [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110, issue 20. P. 205001.
7. *Медведев, Ю. В.* Нелинейные явления при распадах разрывов в разреженной плазме / Ю. В. Медведев. Москва : Физматлит, 2012. 344 с.
8. Observation of Collisionless Shocks in Laser-Plasma Experiments / L. Romagnani [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101, issue 2. P. 025004.
9. *Gruzinov, A.* Gamma-Ray Burst Phenomenology, Shock Dynamo, and the First Magnetic Fields / A. Gruzinov // *The Astrophysical Journal*. 2001. Vol. 563, no. 1. P. L15–L18.
10. *Lyubarsky, Y.* Are Gamma-Ray Burst Shocks Mediated by the Weibel Instability? / Y. Lyubarsky, D. Eichler // *The Astrophysical Journal*. 2006. Vol. 647, no. 2. P. 1250–1254.
11. *Garasev, M.* Impact of continuous particle injection on generation and decay of the magnetic field in collisionless shocks / M. Garasev, E. Derishev // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. Vol. 461, no. 1. P. 641–646.
12. *Medvedev, M. V.* Generation of Magnetic Fields in the Relativistic Shock of Gamma-Ray Burst Sources / M. V. Medvedev, A. Loeb // *The Astrophysical Journal*. 1999. Vol. 526, no. 2. P. 697–706.
13. *Spitkovsky, A.* Particle Acceleration in Relativistic Collisionless Shocks: Fermi Process at Last? / A. Spitkovsky // *The Astrophysical Journal*. 2008. Vol. 682, no. 1. P. L5–L8.
14. Observation of magnetic field generation via the Weibel instability in interpenetrating plasma flows / C. M. Huntington [et al.] // *Nature Physics*. 2015. Vol. 11, no. 2. P. 173–176.
15. Collisionless electrostatic shock generation using high-energy laser systems / Y. Sakawa [et al.] // *Advances in Physics: X*. 2016. Vol. 1, no. 3. P. 425–443.
16. Weibel-Induced Filamentation during an Ultrafast Laser-Driven Plasma Expansion / K. Quinn [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108, issue 13. P. 135001.
17. Magnetic field production via the Weibel instability in interpenetrating plasma flows / C. M. Huntington [et al.] // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24, no. 4. P. 041410.
18. *Komar, C. M.* Comparative analysis of dayside magnetic reconnection models in global magnetosphere simulations / C. M. Komar, R. L. Fermo, P. A. Cassak // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. Vol. 120, no. 1. P. 276–294.
19. *Komar, C. M.* The local dayside reconnection rate for oblique interplanetary magnetic fields / C. M. Komar, P. A. Cassak // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2016. Vol. 121, no. 6. P. 5105–5120.
20. *Tchekhovskoy, A.* Three-dimensional analytical description of magnetized winds from oblique pulsars / A. Tchekhovskoy, A. Philippov, A. Spitkovsky // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. Vol. 457, no. 3. P. 3384–3395.

21. Particle acceleration in axisymmetric pulsar current sheets / В. Cerutti [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2015. Vol. 448, no. 1. P. 606–619.
22. Тонкие токовые слои в бесстолкновительной плазме: равновесная структура, плазменные неустойчивости и ускорение частиц / Л. М. Зелёный [и др.] // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 2. С. 137–182.
23. Малова, Х. В. Структура и динамика «хвоста» магнитосферы / Х. В. Малова, Л. М. Зелёный // Плазменная гелиогеофизика : в 2 т. Т. 1. Москва : Физматлит, 2008. С. 434–459.
24. Somov, B. V. Plasma Astrophysics, Part II: Reconnection and Flares / B. V. Somov. Second. New York : Springer, 2013. 506 p.
25. Веселовский, И. С. Солнечный ветер и гелиосферное магнитное поле / И. С. Веселовский // Модель космоса : научно-информационное издание : в 2 т. Т. 1 / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Москва : КДУ, 2007. С. 314–359.
26. Current Systems in Planetary Magnetospheres and Ionospheres / W. Baumjohann [et al.] // Space Science Reviews. 2010. Vol. 152, no. 1–4. P. 99–134.
27. Плазменная гелиогеофизика : монография : в 2 т. / под ред. Л. М. Зелёного, И. С. Веселовского. Москва : Физматлит, 2008. Гл. 3–5.
28. Richardson, J. D. Shocks and sheaths in the heliosphere / J. D. Richardson // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. Vol. 73, no. 11/12. P. 1385–1389.
29. Heikkila, W. J. Earth's Magnetosphere : Formed by the Low-Latitude Boundary Layer / W. J. Heikkila. Elsevier, 2011. P. 536.
30. Wu, C.-C. Statistical Comparison of Magnetic Clouds with Interplanetary Coronal Mass Ejections for Solar Cycle 23 / C.-C. Wu, R. P. Lepping // Solar Physics. 2010. Vol. 269, no. 1. P. 141–153.
31. Interaction between magnetic clouds and the heliospheric current sheet at 1AU as it is observed by one single observation point / J. J. Blanco [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. Vol. 73, no. 11/12. P. 1339–1347.
32. High-latitude Conic Current Sheets in the Solar Wind / O. V. Khabarova [et al.] // The Astrophysical Journal. 2017. Vol. 836, no. 1. P. 108.
33. Romashets, E. P. Modeling of the magnetic field in the magnetosheath region / E. P. Romashets, S. Poedts, M. Vandas // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2008. Vol. 113, A2. A02203.
34. Lopez, R. E. The role of the bow shock in solar wind-magnetosphere coupling / R. E. Lopez, V. G. Merkin, J. G. Lyon // Annales Geophysicae. 2011. Vol. 29, no. 6. P. 1129–1135.
35. A model of the magnetosheath magnetic field during magnetic clouds / L. Turc [et al.] // Annales Geophysicae. 2014. Vol. 32, no. 2. P. 157–173.
36. Izmodenov, V. V. Three-dimensional kinetic – MHD model of the global heliosphere with the heliopause – surface fitting / V. V. Izmodenov, D. B. Alexashov // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2015. Vol. 220, no. 2. P. 32.

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. Особенности генерации бесстолкновительной электростатической ударной волны в плазме при лазерной абляции / М. А. Гарасёв, А. И. Кoryтин, В. В. Кочаровский, Ю. А. Мальков, А. А. Мурзанев, А. А. Нечаев, А. Н. Степанов // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, вып. 3. С. 148–152.
- A2. Динамика самосогласованного магнитного поля и диффузионное рассеяние ионов в плазме с сильной анизотропией температуры / Л. В. Бородачёв, М. А. Гарасёв, Д. О. Коломиец, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов, А. А. Нечаев // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, вып. 12. С. 1107–1117.
- A3. Analytical theory of neutral current sheets with a sheared magnetic field in collisionless relativistic plasma / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 932. P. 012019.
- A4. Токовые слои с широким силовым полем магнитного поля / В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов, А. А. Нечаев // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2018. Т. 114, № 1. С. 75–80.
- A5. *Нечаев, А. А.* Возникновение и эволюция волны плотности при расширении горячей плазмы в разреженную ионизованную среду / А. А. Нечаев, М. А. Гарасёв, В. В. Кочаровский // XVII научная школа «Нелинейные волны - 2016». Н. Новгород, 27 февраля – 4 марта 2016 г. : тез. докл. молодых ученых. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2016. С. 108.
- A6. *Nechaev, A.* PIC simulation and physical interpretation of the formation and evolution of an electrostatic shock in a collisionless plasma produced by a fs laser pulse / A. Nechaev, M. Garasev, V. Kocharovsky // 2016 International Conference Laser Optics (LO). Saint Petersburg, Russia : IEEE, 2016. R5–14. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7549802/> (visited on 05/29/2019).
- A7. Dynamics of inhomogeneous plasma expansion in intense femtosecond laser-ablated aluminum plumes / A. Stepanov, M. Garasev, A. Korytin, V. Kocharovsky, Y. Mal'kov, A. Murzanev, A. Nechaev, D. Yashunin // 2016 International Conference Laser Optics (LO). Saint Petersburg, Russia : IEEE, 2016. R5–5. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7549793/> (visited on 05/29/2019).
- A8. Density bump formation at the front of a collisionless electrostatic shock wave in a laser ablated plasma / M. A. Garasev, V. V. Kocharovsky, A. A. Nechaev, A. N. Stepanov // Int. Symp. Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2017), Moscow – St. Petersburg, Russia, July 22–28, 2017 : Proc. N. Novgorod : IAP RAS, 2017. P. 166.
- A9. Generation of magnetic fields behind the front of an electrostatic shock wave in a laser plasma / A. N. Stepanov, M. A. Garasev, V. V. Kocharovsky, A. I. Korytin, Y. A. Mal'kov, A. A. Murzanev, A. A. Nechaev // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). Saint Petersburg, Russia : IEEE, 2018. P. 242. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8435840/> (visited on 05/29/2019).

- A10. Formation of a density bump at the front of a collisionless shock wave during the expansion of a laser plasma / A. V. Mishin, A. A. Nechaev, M. A. Garasev, A. N. Stepanov, V. V. Kocharovskiy // Int. Conference-School "Shilnikov WorkShop 2018". Nizhny Novgorod, December 17–18, 2018 : Book of Abstracts. N. Novgorod : Lobachevsky State University, 2018. P. 33–34.
- A11. Формирование горба плотности на фронте бесстолкновительной ударной волны при разлете горячей плотной плазмы в разреженную / А. В. Мишин, А. А. Нечаев, М. А. Гарасёв, А. Н. Степанов, В. В. Кочаровский // V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019: Сб. науч. тр. Ч. 2. Москва : НИЯУ МИФИ, 2019. С. 87–88.
- A12. Возникновение горба плотности на фронте бесстолкновительной ударной волны при разлете горячей плотной плазмы в холодную разреженную / А. В. Мишин, А. А. Нечаев, М. А. Гарасёв, А. Н. Степанов, В. В. Кочаровский // 24-я Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки). Н. Новгород, 21–24 мая 2019 г. : материалы докл. Н. Новгород, 2019. В печати.
- A13. Density bump formation at the front of a collisionless shock wave during the expansion of a laser plasma / A. V. Mishin, A. A. Nechaev, M. A. Garasev, A. N. Stepanov, V. V. Kocharovskiy // VII Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP 2019) N. Novgorod – Saratov – N. Novgorod, June 28 – July 4, 2019 : Proc. N. Novgorod : IAP RAS, 2019. In press.
- A14. Density bump formation in a collisionless electrostatic shock wave in a laser-ablated plasma [Электронный ресурс] / М. А. Garasev, А. I. Korytin, V. V. Kocharovskiy, Y. A. Malkov, А. А. Murzanev, А. А. Nechaev, А. N. Stepanov. arXiv: 1607.02176v1. URL: <https://arxiv.org/abs/1607.02176v1> (visited on 06/04/2019).
- A15. Генерация магнитного поля за фронтом бесстолкновительной ударной волны при разлете горячей плотной плазмы / А. А. Нечаев, М. А. Гарасёв, А. В. Степанов Мишин, А. Н., В. В. Кочаровский // V Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019: Сб. науч. тр. Ч. 2. Москва : НИЯУ МИФИ, 2019. С. 89–90.
- A16. Согласованная эволюция электронных и ионных токов при развитии вейбелевской неустойчивости в двухтемпературной плазме / А. А. Нечаев, Л. В. Бородачев, М. А. Гарасёв, Д. О. Коломиец, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов // Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Москва, 12–16 февраля 2018 г. : сб. тез. докл. Москва : ИКИ РАН, 2018. С. 369.
- A17. Нелинейная стадия вейбелевской неустойчивости и согласованная эволюция токов электронов и ионов в плазме с анизотропией температуры / А. А. Нечаев, Л. В. Бородачев, М. А. Гарасёв, А. А. Беляев, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов // «Нелинейные волны - 2018». XVIII научная школа. Н. Новгород, 26 февраля – 4 марта 2018 г. : тез. докл. молодых ученых. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2018. С. 123.

- A18. Long-term consistent evolution of electron and ion currents generated via the Weibel instability in a plasma with temperature anisotropy / V. V. Kocharovsky, A. A. Belyaev, L. V. Borodachev, M. A. Garasev, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Kanazawa, Japan, November 12–17, 2018 : Abstracts. AAPPS, 2018. URL: <http://aappsdp.org/DPP2018Program/pdf/L-O9.pdf> (visited on 04/26/2019).
- A19. Spatial spectrum of quasi-magnetostatic turbulence at the growth, saturation and decay phases of Weibel instability in collisionless plasma / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Kanazawa, Japan, November 12–17, 2018 : Abstracts. AAPPS, 2018. URL: <http://aappsdp.org/DPP2018Program/pdf/F-O12.pdf> (visited on 04/26/2019).
- A20. Generation of magnetic field behind the front of a collisionless shock wave during the expansion of a laser plasma / A. A. Nechaev, M. A. Garasev, A. N. Stepanov, V. V. Mishin A. V. Kocharovsky // Int. Conference-School "Shilnikov WorkShop 2018". Nizhny Novgorod, December 17–18, 2018 : Book of Abstracts. N. Novgorod : Lobachevsky State University, 2018. P. 36.
- A21. Электрон-ионная неустойчивость Вейбеля и квазимагнитостатические филаменты тока в звездном ветре / В. В. Кочаровский, Л. В. Бородачѐв, Д. О. Коломиец, В. В. Кочаровский, А. А. Нечаев // Четырнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Москва, 11–15 февраля 2019 г. : сб. тез. докл. Москва : ИКИ РАН, 2019. С. 207.
- A22. Generation of magnetic fields in an expanding laser plasma with hot electrons / A. A. Nechaev, M. A. Garasev, A. N. Stepanov, A. V. Mishin, V. V. Kocharovsky // VII Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP 2019) N. Novgorod – Saratov – N. Novgorod, June 28 – July 4, 2019 : Proc. N. Novgorod : IAP RAS, 2019. In press.
- A23. Long-term nonlinear dynamics of electron-ion Weibel instability in laser plasmas and stellar winds / V. V. Kocharovsky, L. V. Borodachev, M. A. Garasev, D. O. Kolomiets, A. A. Nechaev // 46th European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS 2019). Milan, Italy, July 8–12, 2019 : Abstracts. European Physical Society, 2019. URL: <http://ocs.ciemat.es/EPS2019ABS/pdf/O3.403.pdf> (visited on 04/26/2019).
- A24. Variety of self-consistent magnetic field structures in a collisionless plasma: exact solutions to a nonlinear many-particle relativistic problem / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev, S. V. Tarasov // VI Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP 2016). N. Novgorod – St. Petersburg – N. Novgorod, Russia, July 17–23, 2016 : Proc. N. Novgorod : IAP RAS, 2016. 340 p.
- A25. Analytical theory of neutral current sheets with a sheared magnetic field in collisionless relativistic plasma / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // Physics of Neutron Stars - 2017. 50 years after the Pulsar Discovery : Int. Conf. : St. Petersburg, Russia, July 10–14, 2017 : Book of Abstracts / ed. by D. A. B. [ al.] St. Petersburg : SINEL, 2017. P. 89.

- A26. Current sheets with a sheared magnetic field: From analytical modeling to applications / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // Всероссийская астрономическая конференция - 2017. «Астрономия: познание без границ». Ялта, респ. Крым, 17–22 сентября 2017 г. : сб. тез. Ялта : КРАО РАН, 2017. С. 62.
- A27. Новый класс токовых слоев с широм магнитного поля / В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов, А. А. Нечаев // Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Москва, 12–16 февраля 2018 г. : сб. тез. докл. Москва : ИКИ РАН, 2018. С. 260. URL: <https://plasma2018.cosmos.ru/docs/abstract-book-plasma2018.pdf> (дата обр. 27.05.2019).
- A28. Analytical theory of neutral current sheets with a sheared magnetic field separating homogeneously magnetized plasma regions / A. A. Nechaev, V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov // 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Kanazawa, Japan, November 12–17, 2018 : Abstracts. AAPPS, 2018. URL: <http://aappsdpp.org/DPP2018Program/pdf/SAP-7.pdf> (visited on 04/26/2019).
- A29. Kinetic nonlinear theory of the current structure of a magnetopause / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // VII Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP 2019) N. Novgorod – Saratov – N. Novgorod, June 28 – July 4, 2019 : Proc. N. Novgorod : IAP RAS, 2019. In press.
- A30. Analytical model of a current sheet at a magnetosheath's boundary in a collisionless plasma / V. V. Kocharovsky, V. V. Kocharovsky, V. Y. Martyanov, A. A. Nechaev // 46th European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS 2019). Milan, Italy, July 8–12, 2019 : Abstracts. European Physical Society, 2019. URL: <http://ocs.ciemat.es/EPS2019ABS/pdf/P4.4016.pdf> (visited on 04/26/2019).
- A31. Аналитическая модель токовой структуры границы магнитослоя в бесстолкновительной плазме / В. В. Кочаровский, В. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов, А. А. Нечаев // Письма в Астрономический журнал. 2019. Т. 45. В печати.