

На правах рукописи

Sign

Шустов Павел Игоревич

Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли

Специальность 01.03.01 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН
Петрукович Анатолий Алексеевич

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**
доктор физико-математических наук, профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник
Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования с длинным длинным длинным длинным названием

Защита состоится DD mmmmmmmmm YYYYY г. в XX часов на заседании диссертационного совета Д123.456.78 при Название учреждения по адресу: Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Название библиотеки.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: Адрес, ученому секретарю диссертационного совета Д123.456.78.

Автореферат разослан DD mmmmmmmmm2024 года.
Телефон для справок: +7 (0000) 00-00-00.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д123.456.78,
д-р физ.-мат. наук

Sign
Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Плазма, являясь четвертым состоянием вещества, кардинально отличается от трех основных состояний, с которыми люди сталкиваются в повседневной жизни. Несмотря на то, что плазма редко встречается на Земле, она доминирует в масштабах Вселенной, из нее состоят звезды, она заполняет космическое пространство между ними. Многие свойства плазмы, отличающие её от других состояний вещества, обусловлены наличием дальнедействующих электромагнитных сил во взаимодействии составляющих её частиц. Особенно сильно эти свойства проявляются в случае достаточно разреженной и сильно ионизированной плазмы, когда эффекты столкновения между частицами становятся пренебрежимо малы в сравнении с эффектами электромагнитного взаимодействия между ними. Именно такими свойствами в большинстве случаев обладает бесстолкновительная плазма заполняющая космическое пространство.

В бесстолкновительной космической плазме обычный механизм термализации в виде соударения частиц отсутствует. Вместо этого основную роль в процессе перераспределения энергии между разными популяциями плазмы играет механизм взаимодействия через электромагнитные поля, что приводит к образованию различных сложных самосогласованных магнитоплазменных структур [6; 7].

Пожалуй, наиболее изученными являются такие структуры, как токовые слои [8–12] и ударные волны [13–17]. Например, известно, что в токовых слоях может происходить пересоединение силовых линий магнитного поля — фундаментальный процесс в физике плазмы, при котором происходит высвобождение большого количества энергии [18–20]. На токовых слоях эффективно рассеиваются заряженные частицы, ускоряются или тормозятся, а также развиваются плазменные неустойчивости [12]. Про ударные волны также хорошо известно, что они представляют из себя области эффективного энергообмена между популяциями плазмы с помощью электромагнитного поля [21; 22]. Однако, помимо наиболее крупномасштабных и детально изученных структур, также существенную роль в обеспечении энергетических перетоков в плазме играют большое количество менее исследованных различных волн и самосогласованных структур, например, несжимаемые Альфвеновские волны [23–25], магнитные жгуты [26–29], магнитные острова [30–32], различные плазмиды [33–36], а также магнитные дыры [37–39].

Магнитные дыры представляют из себя устойчивые, вихреподобные магнитоплазменные структуры, внутри которых локальный минимум давления магнитного поля компенсируется повешенным плазменным давлением. Впервые подробное описание наблюдения магнитных дыр и их

изучение было представлено в работе [37] в 1977 году. В ней описываются локализованные минимумы модуля магнитного поля в солнечном ветре (которые и были названы магнитными дырами), обнаруженные по данным спутниковой миссии Explorer 43 (IMP-6). Ранее данные структуры также наблюдались в магнитосфере Земли [40] (но подробно не исследовались). После работы Тернера 1977-го года [37] и нескольких последующих исследований [41; 42] магнитные дыры стали активно изучаться и были обнаружены так или иначе почти во всех магнитоплазменных космических системах. Есть большое количество современных наблюдений и исследований магнитных дыр в различных областях: в солнечном ветре [43–47]; в магнитосферах Земли [38; 48–56] и других планет [57–60]; вокруг комет [61–63]; и в других областях гелиосферы вплоть до её границы [64–68]. Также в лабораторной плазме аналогом магнитных дыр из космической плазмы является классический –пинч [69; 70]. Данные структуры являются крайне устойчивыми: магнитные дыры, образующиеся вблизи Меркурия и Венеры, могут сохраняться и переноситься потоком солнечного ветра до орбиты Земли [44] и даже Сатурна [43].

Пространственные масштабы магнитных дыр варьируются в очень широких пределах: от электронных дыр, характерный масштаб области минимума магнитного поля порядка нескольких электронных гирорадиусов [71; 72], до гелиосферных ионных магнитных дыр с масштабами, превышающими 10^6 км. [41; 65]. Структура магнитных дыр электронного масштаба полностью определяется кинетикой электронов [73; 74], в то время как крупномасштабные магнитные дыры являются магнитогидродинамическими структурами [75; 76].

Интересным и важным классом магнитных дыр, наблюдаемым в космосе [51; 53] и воспроизводимым в симуляциях [72; 77], является класс субионных магнитных дыр, пространственный масштаб которых, порядка или меньше локального ионного гирорадиуса. Данные структуры поддерживаются вихревыми электронными токами, которые создают цилиндрически симметричный градиент магнитного поля с осью симметрии вдоль вектора фонового магнитного поля [53]. Представители данного класса потенциально играют важную роль в энергообмене между популяциями ионов и электронов за счет вклада в каскад энергии посредством возбуждения волновой активности на электронном масштабе [78; 79]. Субионные магнитные дыры представляют большой интерес для изучения вследствие той роли, которую они играют в: генерации сильных холловских электрических полей (см. результаты численного моделирования и наблюдения космических аппаратов в [55; 77; 80]); нагреве электронов и рассеянии частиц (спутниковые наблюдения указывают на наличие захваченной данными структурами популяции горячих электронов [54; 81]); ускорении заряженных частиц (электрическим полем самой магнитной дыры [72]); генерации сильных токов [38; 54; 81]. Исследованию магнитоплазменных

структур именно данного класса — субионных магнитных дыр, наблюдаемых в хвосте магнитосферы Земли, и посвящена данная работа.

Современные спутниковые данные указывают на наличие в хвосте магнитосферы Земли большого числа магнитных дыр данного масштаба (Глава ??), ассоциированных, как правило, с прохождением фронта диполяризации [82; 83]. Возникновение фронта обусловлено пересоединением силовых линий магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли, которое приводит к существенному изменению конфигурации магнитного поля. В частности в ближнем хвосте магнитосферы Земли происходит, так называемая, диполяризация: кратно увеличиваются толщина токового слоя и дипольная компонента магнитного поля B_z в системе координат GSM [84]. Такое диполяризованное магнитное поле распространяется от области пересоединения $\sim 20\text{--}30R_E$ [85; 86] в сторону Земли в виде фронта диполяризации, и сопровождается быстрыми потоками плазмы [83; 87; 88]. Этот фронт диполяризации отделяет горячую разреженную плазму из области пересоединения от холодной фоновой плазмы [89–91]. Свойства фоновой плазмы довольно хорошо изучены [92–94], в то время как свойства горячей плазмы в диполяризованном хвосте гораздо менее исследованы. В отсутствие сильных градиентов магнитного поля (другими словами, в отсутствие сильных токов в диполяризованном хвосте магнитосферы) горячая разреженная плазма находится внутри области диполяризованного поля (то есть в области $|B_z| > |B_x|$, которая может занимать довольно большую часть поперек хвоста). Электроны этой горячей популяции плазмы могут иметь очень высокие температуры, которая может достигать температуры ионов [95]. Другими словами, эта плазма характеризуется большими значениями беты электронов $\beta_e \sim 1 - 10$ (отношение теплового давления электронов к давлению магнитного поля $B_z^2/8\pi$), и большой анизотропией электронов — как правило электроны поперечно-анизотропны, то есть перпендикулярная температура $T_{e,\perp}$ больше параллельной температуры $T_{e,\parallel}$ [54; 96; 97]. Эта горячая анизотропная популяция электронов обладает большим запасом свободной энергии, которая приводит к образованию различных плазменных неустойчивостей [98–100]. Развитие и насыщение таких неустойчивостей приводит к диссипации энергии и термализации горячих электронов, так как возбуждение электронной компоненты в хвосте магнитосферы более эффективно, чем ионной [91; 101; 102].

Более того, по данным современных спутниковых наблюдений, известно что внутри магнитных дыр в действительности присутствует захваченная анизотропная популяция электронов, температура которых существенно выше, температуры фоновых электронов (Глава ?? и [38; 81]). Таким образом, можно ожидать, что при образовании данных магнитных дыр и их взаимодействии с фоновыми электронами происходит их нагрев

и захват. Существует несколько сценариев формирования таких магнитных дыр, большинство из которых предполагают существенный вклад от популяции ионов [103–106]. Как следствие, можно ожидать, что субионные магнитные дыры могут поддерживать обмен энергии между холодной популяцией электронов и более горячей популяцией ионов. Такой процесс очень важен для плазмы планетарных магнитосфер, где крупномасштабные выбросы энергии (связанные, например, с пересоединением магнитных силовых линий) в основном приводят к передачи энергии магнитного поля в кинетическую и тепловую энергии именно ионов [107; 108], а для объяснения нагрева электронной компоненты необходимы дополнительные механизмы. Таким образом, исследование нелинейной стадии эволюции неустойчивостей субионного масштаба (магнитных дыр) в диполяризованном хвосте магнитосферы актуально для понимания процессов нагрева электронов.

Формирование магнитных дыр субионного масштаба было предсказано в кинетическом моделировании динамики горячих анизотропных электронов [72; 77]. В этом моделировании магнитные дыры представляли собой локализованные минимумы модуля магнитного поля, заполненные горячими поперечно-анизотропными электронами, генерирующими сильные токи на границах этих структур, что в дальнейшем было подтверждено спутниковыми наблюдениями [38; 80]. Для некоторых магнитных дыр значительная часть электронного тока на границах поддерживается $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфом в радиальном холловском электрическом поле [38], но обычно основной вклад в поддержание структуры субионных магнитных дыр вносят диамагнитные электронные токи [54; 81].

Как обсуждалось ранее, гибридный масштаб субионных магнитных дыр, наблюдаемых в хвосте магнитосферы, отличает их от подавляющего большинства магнитных дыр, наблюдаемых, например, в солнечном ветре [43; 75] и магнитослое [52]. Считается, что магнитные дыры ионного масштаба в солнечном ветре и магнитослое образуются на нелинейной стадии ионной зеркальной неустойчивости [45; 103; 106; 109–114]. Образование же субионных магнитных дыр в этих же областях, как правило объясняется развитием электронной зеркальной неустойчивости [115–118] или дрейфовой неустойчивости [55; 119]. Однако данные о конфигурацией плазмы и электромагнитных полей субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы [38; 39; 54; 67; 80; 81] ставят под сомнение применимость этих же механизмов генерации для них. Разберем подробнее потенциальные механизмы генерации:

- Развитие неустойчивости зеркальных мод, или просто зеркальная неустойчивость, общепринято является основным механизмом генерации магнитных дыр. В частности, существует как ионная [45; 103; 106; 109; 110; 114], так и электронная [116–118] зеркальные неустойчивости, основным фактором развития которых является

существенная поперечная анизотропия соответствующих популяций заряженных частиц. Так поперечная анизотропия ионов на фронте диполяризации [120; 121] может приводить к развитию зеркальной ионной неустойчивости, которая потенциально может быть источником магнитных дыр. Но, хотя конфигурация магнитного поля субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы и схожа с конфигурацией солитонов зеркальной моды [106], их поляризация магнитного поля не является линейной, и, таким образом, наблюдаемая поляризация не подтверждает модельных ожиданий [50]. Более того, в области субионных магнитных дыр не наблюдается остаточной ионной поперечной анизотропии [54; 55; 119], вследствие чего эти структуры вряд ли могут быть связаны с развитием ионной зеркальной неустойчивости. Говоря же про электронную зеркальную неустойчивость, в магнитослое, заполненное перпендикулярно анизотропной плазмой от ударной волны солнечного ветра [122; 123], этот механизм действительно может объяснять образование субионных магнитных дыр. Однако в хвосте магнитосферы Земли электроны, как правило, продольно, а не поперечно, анизотропны [124], вследствие чего этот тип плазменной неустойчивости вряд ли является причиной образования субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы.

- Малые скорости движения субионных магнитных дыр относительно плазмы и их гибридные масштабы, позволяют предположить, что эти структуры могут быть результатом развития дрейфовых неустойчивостей [125], часто наблюдаемой в области фронта диполяризации [100; 126]. Тем не менее, такой сценарий не объясняет поперечную анизотропию электронов внутри магнитных дыр, так как электроны, взаимодействующие с дрейфовыми волнами, обычно ускоряются вдоль силовых линий магнитного поля, а не поперек [127; 128]. Также структуры образованные в результате развития дрейфовой неустойчивости характеризуются повышением плотности плазмы и сильными электрическими полями [129; 130], в то время как наблюдаемые магнитные дыры не демонстрируют сильных изменений плотности плазмы и электрических полей [54].
- Альтернативное объяснение образования субионных магнитных дыр было предложено в работе [119], в которой рассмотрены уединенные звуковые волны электронного масштаба. Эта модель не требует ионной анизотропии и способна предсказывать наблюдаемую связь между пространственным масштабом дыр и возмущением магнитного поля [55]. Но эта модель допускает любой пространственный масштаб дыр, и в отсутствие вклада ионов характерным масштабом системы является инерционная длина электронов [119].

Как следствие, в рамках этой модели остается необъяснимым, почему масштабы большинства наблюдаемых субионных магнитных дыр много больше электронных масштабов – характерный масштаб наблюдаемых субионных магнитных дыр составляет десятки электронных гирорадиусов [48; 54; 55].

Существует также некоторое количество альтернативных моделей генерации магнитных дыр построенных на рассмотрении нелинейных Альфвеновских волн и магнитозвуковых солитонов [131–133], однако все они также обладают вышеописанными недостатками, связанными с невозможностью объяснить для субионных магнитных дыр комплекс наблюдаемых свойств самих дыр и параметров окружающей плазмы. Таким образом, механизм появления субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы остается открытым, а вопрос их изучения — актуальным.

Целью представляемого исследования является комплексное изучение субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы, установление свойств и законов, описывающих данные структуры. Можно выделить несколько глобальных задач данного исследования.

- Сбор статистических свойств реально наблюдаемых субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы с помощью данных околоземных спутниковых миссий. На основе собранных данных разработка реалистичной и непротиворечивой гипотезы формирования этих структур.
- Построение физических моделей (на основе как кинетического, так и магнитогидродинамического рассмотрения данных структур), которые будут описывать реально наблюдаемые свойства субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы Земли.
- Изучение линейных вольных плазменных колебаний, характерных для плазмы, в которой наблюдаются субионные магнитные дыры в контексте изучения механизмов, которые могут приводить к генерации данных структур.
- Исследование крупномасштабных связей в магнитосфере Земли, которые обусловлены субионными магнитными дырами в хвосте, на основе сопоставления спутниковых данных из хвоста и наземных оптических наблюдений ионосферы.

Научная новизна. Субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли обнаружены относительно недавно (первая работа с их описанием опубликована в 2011 году [38; 48; 50]), и статистических исследований с большим набором данных прямых спутниковых наблюдений по ним не было. Также, как ранее было подробно изложено в актуальности темы, существующие модели не в полной мере описывают наблюдаемые особенности этих магнитных дыр, а также ни один из известных

механизмов генерации подобных структур не удовлетворяет набору наблюдательных фактов. Поэтому, в рамках данной работы:

1. Впервые собрана и изучена подробная статистика наблюдений субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы Земли по данным спутниковой миссии THEMIS за три года. В рамках анализа данной статистики, путем сравнения с результатами численного моделирования, впервые установлено, что источником этих структур являются неустойчивости развивающиеся на диполяризованном фронте.
2. Найдена и исследована мода линейных колебаний в трехкомпонентной плазме, параметры которой (при почти перпендикулярном к магнитному полю распространении) соответствуют наблюдаемым свойствам плазмы вблизи изучаемых субионных магнитных дыр. Впервые выдвинута гипотеза, что субионные магнитные дыры могут являться нелинейной стадией эволюции данной моды.
3. Впервые показано, что одним из источников мелкомасштабной структуры в полярном сиянии (диффузионной авроре) являются субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли.

Научная и практическая значимость. Субионные магнитные дыры, являясь устойчивыми магнитоплазменными структурами, и обеспечивая нелинейные возмущения магнитного поля и теплового давления электронов на субионных масштабах (порядка и менее ионного гирорадиуса) могут играть важную роль в рассеянии и захвате частиц.

В частности, в работе показано, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли обеспечивают процесс переноса горячей компоненты электронов, нагретой на фронте диполяризации, в область спокойной плазмы за фронтом (в область диполяризованного хвоста). Горячая компонента электронов, локализованная внутри магнитных дыр, представляют собой неоднородность, с которой активно электронные циклотронные волны, излучаемые фоновыми электронами. Также, показано, что сами дыры должны взаимодействовать с фоновыми субтепловыми ионами (за счет обнаруженного дрейфа самих дыр). Таким образом, субионные магнитные дыры играют существенную роль в важном вопросе переноса энергии между компонентами плазмы в хвосте магнитосферы.

Также, в работе представлены стационарные модели субионных магнитных дыр, которые могут быть применены для моделирования рассеяния заряженных частиц на структуре магнитных дыр. Такое моделирование может пролить свет на важный вопрос термализации электронов в хвосте магнитосферы. В частности, в работе построена трехмерная модель магнитных дыр, позволяющая исследовать объемное распределение токов и магнитных полней.

Помимо прочего, значимым научным результатом данной работы, является детальное описание и изучение новой плазменной моды линейных колебаний трехкомпонентной плазмы (две компоненты электронов и одна компонента электронов), характерной для наблюдаемых субионных магнитных дыр.

Также, в данной работе представлено исследование, устанавливающее связь между мелкомасштабными структурами диффузионной авроры (полярных сияний) и субионными магнитными дырами в хвосте магнитосферы. Данный результат является значимым как для изучения авроральных сияний, так и в общем контексте магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли связаны с развитием неустойчивостей горячей анизотропной популяции электронов на фронте диполяризации, и обеспечивают перенос горячих электронов через фронт диполяризации.
2. Разработаны двумерные кинетические и трехмерная магнитогидродинамическая модели субионных магнитных дыр, в рамках которых установлены ограничения на параметры данных нелинейных плазменных структур.
3. Обнаружена и исследована электромагнитная мода линейных колебаний в трехкомпонентной плазме, характеристики которой соответствуют свойствам наблюдаемых субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы. Сравнение с данными спутниковых наблюдений показало, что рассмотренная *электронно-магнитозвучковая* мода является наилучшим кандидатом на роль линейной стадии генерации субионных магнитных дыр.
4. Показано, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы являются источником мелкомасштабной структуры полярных сияний и, таким образом, поддерживают магнитосферно-ионосферную связь на малых пространственных масштабах.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным подходом изучения объекта исследования, считающим в себе анализ данных наблюдений космических аппаратов и их сопоставление с результатами численного моделирования и теоретическими предсказаниями. Используемые наблюдательные данные взяты из открытых источников (спутниковая миссия THEMIS <http://themis.ssl.berkeley.edu/>), являются предварительно обработанными и верифицированными, а также апробированными в большом количестве опубликованных научных работ. Корректность оригинальных методов, применяемых для численного моделирования, подтверждена тестированием на задачах с известными решениями, а также физичностью и самосогласованностью результатов. Достоверность теоретических предсказаний обусловлена корректностью представленных

аналитических выкладок и согласованностью с известными физическими законами. Непротиворечивость и согласованность всех подходов обеспечивает высокую степень достоверности представленной работы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на различных российских и международных научных конференциях, таких как:

- Международная конференция «Problems of Geocosmos» (СПбГУ, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, 2016)
- Ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (ИКИ РАН, Россия, Москва, 2017, 2018)
- Ежегодный семинар «Physics of Auroral Phenomena» (ПГИ РАН, Россия, Апатиты, 2017, 2018, 2019)
- Ежегодная международная конференция «American Geophysical Union Fall Meeting» (United States, New Orleans 2017, San Francisco 2019)
- Ежегодная международная конференция «European Geosciences Union General Assembly» (Austria, Vienna, 2018, 2021)
- Международная конференция «5th Cluster-THEMIS workshop» (Greece, Crete, Chania, 2018)
- Международная конференция «29th Cluster workshop» (Spain, Canary Island, Lanzarote, 2019)

Личный вклад. Текст диссертации основан на 5 научных публикациях [A1–A5], объединенных одной тематикой исследования в которых автор диссертации является первым автором. Постановка и обсуждение задач велись совместно с научным руководителем и коллегами. Все основные результаты получены лично автором. В описании и обсуждении результатов используется несколько иллюстраций (рисунки ??, ??, ??e-f, ??b), полученных коллегами при совместной работе над тематикой исследования.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, все изданы в журналах, рекомендованных ВАК, все — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Содержание работы

Во **введении** осуждаются актуальность и представляемой работы, ставятся цели и задачи, обосновываются новизна, вводятся понятия, необходимые для дальнейшего изложения, а также основные представления об объекте и предмете исследования.

В **первой главе** подробно изучаются статистические свойства субионных магнитных дыр, наблюдаемых в хвосте магнитосферы Земли, на основе наблюдательных данных спутниковой мисси THEMIS. Выделение

энергии во время пересоединения магнитных силовых линий в хвосте магнитосферы приводит к образованию быстрых потоков плазмы, которые переносят энергию во внутреннюю магнитосферу. Взаимодействие данных потоков с окружающей плазмой происходит на передней кромке (фронте) потока, что проявляется в резком увеличении дипольной компоненты магнитного поля. Описанное явление называется фронтом диполяризации. В первой главе мы исследуем магнитоплазменную структуру возмущения кинетических масштабов, наблюдаемых за фронтами диполяризации. Используя события наблюдения фронтов диполяризации в околоземном хвосте магнитосферы с помощью данных спутниковой миссии THEMIS, в рамках работы обнаружены магнитные дыры суб-ионного масштаба в основном вокруг экваториальной плоскости магнитосферного хвоста. Данные структуры содержат популяцию горячих поперечно-анизотропных электронов, вероятно, нагретых на фронте диполяризации. Обобщив данные спутниковых наблюдений, аналитические оценки и результаты particle-in-cell моделирования, выдвинуто предположение, что эти суб-ионные магнитные дыры появляются в следствие баллонной/перестановочной неустойчивости на фронте диполяризации. Они могут представлять собой нелинейную стадию возмущений магнитного поля, связанную с неустойчивостью фронта, которая уносит в себе горячие электроны за фронт диполяризации. В главе также обсуждается возможная роль этих дыр в рассеянии и нагреве электронов и ионов в диполяризованном хвосте магнитосферы.

Во второй главе предложено несколько моделей суб-ионных магнитных дыр. Сначала развиваются одномерные кинетические модели цилиндрически-симметричных магнитных дыр суб-ионного масштаб, с использованием двух типов функций распределения заряженных частиц. Продемонстрировано, что полученные в рамках этих моделей магнитные дыры имеют конфигурации, схожие с теми, которые наблюдаются в данных спутниковых миссий в хвосте магнитосферы Земли: на границе магнитных дыр наблюдаются локализованные электронные токи, а также присутствуют сильные радиальные электрические поля. Показано, что для типичных значений параметров плазмы хвоста магнитосферы включение в модель ионных токов приводит к образованию магнитных дыр с двухмасштабным профилем магнитного поля. Такая структура не соответствует наблюдаемым данным, что подтверждает основную роль электронной компоненты в поддержании стабильности этих структур. Также, показано, что глубина магнитных дыр (амплитуда уменьшения модуля магнитного поля) зависит от радиуса магнитных дыр. Далее, выполнен переход к построению трехмерных моделей магнитных дыр. Предложена трехмерная модель магнитной дыры, в основе которой лежит приближение одножидкостной магнитной гидродинамики и предположения об определенной иерархии

пространственных масштабов с четким разделением градиентов магнитных полей. В работе показано, что такие трехмерные модели магнитных дыр могут быть получены как обобщение предыдущих одномерных моделей, в основе которых лежит кинетический подход. Рассматриваемая модель содержит две компоненты магнитного поля и токи, протекающие вдоль силовых линий магнитного поля. Полученная конфигурация магнитного поля напоминает магнитную ловушку, в которой захваченные горячие частицы плазмы осциллируют между точками отражения.

В **третьей главе** рассматриваются субионные магнитные дыры в контексте линейных мод магнитоплазменных возмущений. Субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли по своим свойствам напоминают магнитозвуковые уединенные волны, но при этом не содержат каких-либо существенных возмущений плотности. Вместо этого провал модуля магнитного поля уравнивается давлением горячих электронов. В данной главе исследуются линейные моды плазменных колебаний при наличии двух популяций электронов (с разной температурой) и одной компонентой ионов, с целью найти моду, свойства которой (направление распространения, скорость, поляризация и возмущения плотности/температуры) соответствуют свойствам наблюдаемых суб-ионных магнитных дыр. В рамках линейного анализа такой трехкомпонентной плазмы найдена и исследована электромагнитная мода с медленным, почти поперечным распространением, и отсутствием возмущений плотности. Возмущения магнитного поля в этой моде уравниваются возмущением давления горячих электронов, что соответствует свойствам наблюдаемых субионных магнитных дыр. Данная мода напоминает электронно-акустическую моду с поперечным распространением волн в горячей плазме и значительным возмущением магнитного поля. Таким образом, данная мода названа электронно-магнитозвуковой. В данной главе подробно исследуются свойства этой моды и сравниваются с данными спутниковых наблюдений.

В **четвертой главе** устанавливаются взаимосвязи между субионными магнитными дырами в хвосте магнитосферы и мелкомасштабной структурой в оптических наблюдениях фоторегистратора небосвода (мелкомасштабная структура высыпаний, приводящих к появлению полярных сияний). Диполяризация хвоста магнитосферы во время суббурь представляет собой мезомасштабное динамическое явление, хорошо исследованное наблюдениями спутниковыми миссиями, численным моделированием и наземными оптическими измерениями. Высвобождение энергии магнитного поля во время суббурь приводит к значительному нагреву плазмы и образованию сильных градиентов температуры и плотности за фронтом диполяризации. Такие градиенты являются источником многих нестабильностей плазмы, ответственных за дальнейший перенос энергии на

меньшие пространственные масштабы. В данной главе сопоставляются спутниковые и оптические наблюдения развития неустойчивостей, связанных с образованием магнитных дыр суб-ионного масштаба в экваториальном диполяризованном хвосте магнитосферы. Измерения спутников THEMIS показывают, что эти дыры направленно дрейфуют в пространстве и связаны с сильными градиентами температуры электронной компоненты (на масштабе 100–200 км). Оптические наблюдения с помощью фоторегистраторов небосвода демонстрируют наличие мелкомасштабных структур полярных сияний, связанных с активной областью (фронтом диполяризации). Сопоставление спутниковых и оптических наблюдений позволяет предположить наличие непосредственной связи между суб-ионными структурами магнитного поля (в частности, магнитными дырами), и мелкомасштабной структурой полярных сияний. Более того, по результатам работы выдвигается предположение, что суб-ионные возмущения в хвосте магнитосферы, благодаря этой связи и наличию продольных токов, являются непосредственными источниками мелкомасштабной структуры полярных сияний.

В **заключении** приводятся и обсуждаются основные результаты работы.

Представленная диссертационная работа посвящена изучению субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы Земли. Исследование начато со сбора наблюдательного материала (Глава ??): в данных спутниковой миссии THEMIS в хвосте магнитосферы обнаружено большое количество субионных магнитных дыр, наблюдаемых непосредственно после процесса диполяризации. Подробный статистический анализ собранных событий и их сравнение с результатами моделирования позволили заключить, что данные структуры:

- наблюдаются в спокойной, диполяризованной области хвоста магнитосферы
- образованы анизотропными горячими электронами, нагретыми на фронте диполяризации, и проникшими за фронт вследствие развития баллонной обменной неустойчивости
- локализованы вблизи нейтральной плоскости токового слоя хвоста магнитосферы
- не заморожены в фоновую плазму, а медленно движутся относительно неё.

Далее, отталкиваясь от известных характеристик субионных магнитных дыр, разработаны модели их стационарных состояний: кинетические одномерные цилиндрически симметричные модели (Глава ??), и трехмерная магнитогидродинамическая (Глава ??). Кинетические модели хорошо описывают пространственные характеристики наблюдаемых магнитных дыр, а также подтверждают наблюдательный факт участия только электронов в поддержании структуры данных магнитных дыр (отсутствует вклад от

ионов). Далее, используя одномерный профиль давления из кинетической модели и предположения об иерархии пространственных масштабов структуры, построена трехмерная магнитогидродинамическая модель субионной магнитной дыры. Полученная трехмерная конфигурация магнитного поля схожа с конфигурацией поля в магнитной ловушке, но в отличие от неё, при рассматриваемых параметрах, не удерживает плазму от распространения вдоль силовых линий магнитного поля.

С целью изучения механизма генерации субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы Земли, были подробно изучены линейные моды колебаний плазмы, характеристики которой советуют наблюдаемым спутниками значениям (Глава ??). Таким образом была обнаружена новая линейная мода, появляющаяся исключительно в трехкомпонентной плазме (две компоненты электронов и одна – ионов), что характерно для субионных магнитных дыр, в которых помимо фоновых компонент электронов и ионов наблюдается дополнительная горячая и разреженная компонента электронов. Свойства найденной моды подробно изучены, и показано, что они схожи с наблюдаемыми свойствами субионных магнитных дыр (скорость распространения, поляризация, соотношение амплитуд возмущений плотности и полей).

В дополнение приводится сопоставление наблюдаемых спутниками субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы с оптическими наблюдениями полярных сияний в одно и тоже время (Глава ??). Показано, что область полярных сияний связана проекцией силовых линий магнитного поля с областью в хвосте магнитосферы Земли, где в этот момент наблюдаются субионные магнитные дыры. Подробно изучена мелкомасштабная структура полярных сияний, и показано, что её пространственно-временные характеристики соответствуют характеристикам субионных магнитных дыр (с учетом масштабирования при проекции вдоль силовых линий). Таким образом, показано, что изучаемые в диссертационной работе структуры, имеют не только локальные проявления в хвосте магнитосферы Земли, но также и глобально связаны с другими областями магнитосферы и оказывают существенное влияние на процессы в них.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Kinetic models of sub-ion cylindrical magnetic hole / P. I. Shustov [и др.] // *Physics of Plasmas*. — 2016. — Дек. — Т. 23, № 12.
- A2. 3D Magnetic Holes in Collisionless Plasmas / P. Shustov [и др.] // *Plasma Physics Reports*. — 2018. — Авг. — Т. 44, № 8. — С. 729–737.
- A3. Statistical Properties of Sub-Ion Magnetic Holes in the Dipolarized Magnetotail: Formation, Structure, and Dynamics / P. I. Shustov

[и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2019. — Янв. — Т. 124, № 1. — С. 342–359.

- A4. In-situ and optical observations of sub-ion magnetic holes / P. Shustov [и др.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2020. — Окт. — Т. 208. — С. 105365.
- A5. Electron magnetosonic waves and sub-ion magnetic holes in the magnetotail plasma / P. I. Shustov [и др.] // Physics of Plasmas. — 2022. — Янв. — Т. 29, № 1.

Список литературы

1. *Gurnett, D. A.* Introduction to Plasma Physics: With Space, Laboratory and Astrophysical Applications / D. A. Gurnett, A. Bhattacharjee. — Cambridge University Press, 02.2017.
2. *Tsyтович, V. N.* Nonlinear Effects in Plasma / V. N. Tsyтович. — Springer US, 1970.
3. *Harris, E. G.* On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field / E. G. Harris // Il Nuovo Cimento. — 1962. — Янв. — Т. 23, № 1. — С. 115–121.
4. Reconstruction of the magnetotail current sheet structure using multi-point Cluster measurements / A. Runov [и др.] // Planet Space Sci. — 2005. — Янв. — Т. 53, № 1–3. — С. 237–243.
5. Thin Current Sheets in the Magnetotail Observed by Cluster / R. Nakamura [и др.] // Space Science Reviews. — 2006. — Февр. — Т. 122, № 1–4. — С. 29–38.
6. Comparison of multi-point measurements of current sheet structure and analytical models / A. V. Artemyev [и др.] // Annales Geophysicae. — 2008. — Сент. — Т. 26, № 9. — С. 2749–2758.
7. Configuration of the Earth's Magnetotail Current Sheet / A. Artemyev [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2021. — Март. — Т. 48, № 6.
8. *De Hoffmann, F.* Magneto-Hydrodynamic Shocks / F. De Hoffmann, E. Teller // Physical Review. — 1950. — Ноябрь. — Т. 80, № 4. — С. 692–703.
9. Energization of solar wind ions by reflection from the Earth's bow shock / G. Paschmann [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1980. — Сент. — Т. 85, A9. — С. 4689–4693.

10. *Goodrich, C. C.* The adiabatic energy change of plasma electrons and the frame dependence of the cross-shock potential at collisionless magnetosonic shock waves / C. C. Goodrich, J. D. Scudder // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1984. — Август. — Т. 89, А8. — С. 6654–6662.
11. Waves in Interplanetary Shocks: A Wind/WAVES Study / L. B. Wilson [и др.] // Physical Review Letters. — 2007. — Июль. — Т. 99, № 4. — С. 041101.
12. Solitary Waves Across Supercritical Quasi-Perpendicular Shocks / I. Y. Vasko [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2018. — Июнь. — Т. 45, № 12. — С. 5809–5817.
13. *Biskamp, D.* Magnetic Reconnection in Plasmas / D. Biskamp. — Cambridge University Press, 09.2000.
14. Electron acceleration from contracting magnetic islands during reconnection / J. F. Drake [и др.] // Nature. — 2006. — Октябрь. — Т. 443, № 7111. — С. 553–556.
15. Stochastic electron acceleration during spontaneous turbulent reconnection in a strong shock wave / Y. Matsumoto [и др.] // Science. — 2015. — Февраль. — Т. 347, № 6225. — С. 974–978.
16. Diffusive shock acceleration and reconnection acceleration processes / G. P. Zank [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2015. — Ноябрь. — Т. 814, № 2. — С. 137.
17. Plasma Heating and Alfvénic Turbulence Enhancement During Two Steps of Energy Conversion in Magnetic Reconnection Exhaust Region of Solar Wind / H. Jansen [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2018. — Апрель. — Т. 856, № 2. — С. 148.
18. MHD-driven Kinetic Dissipation in the Solar Wind and Corona / R. J. Leamon [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2000. — Июль. — Т. 537, № 2. — С. 1054–1062.
19. A weak turbulence theory for incompressible magnetohydrodynamics / S. Galtier [и др.] // Journal of Plasma Physics. — 2000. — Июнь. — Т. 63, № 5. — С. 447–488.
20. *Howes, G. G.* A dynamical model of plasma turbulence in the solar wind / G. G. Howes // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2015. — Май. — Т. 373, № 2041. — С. 20140145.
21. *Büchner, J.* Sheared field tearing mode instability and creation of flux ropes in the Earth magnetotail / J. Büchner, M. Kuznetsova, L. M. Zelenyi // Geophysical Research Letters. — 1991. — Март. — Т. 18, № 3. — С. 385–388.

22. ISEE 3 observations of plasmoids with flux rope magnetic topologies / J. A. Slavin [и др.] // Geophysical Research Letters. — 1995. — Август. — Т. 22, № 15. — С. 2061–2064.
23. FORMATION OF TORUS-UNSTABLE FLUX ROPES AND ELECTRIC CURRENTS IN ERUPTING SIGMOIDS / G. Aulanier [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2009. — Декабрь. — Т. 708, № 1. — С. 314–333.
24. *Bruno, R.* Intermittency in Solar Wind Turbulence From Fluid to Kinetic Scales / R. Bruno // Earth and Space Science. — 2019. — Май. — Т. 6, № 5. — С. 656–672.
25. *Moldwin, M. B.* Plasmoids as magnetic flux ropes / M. B. Moldwin, W. J. Hughes // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1991. — Август. — Т. 96, A8. — С. 14051–14064.
26. Dynamic magnetic island coalescence and associated electron acceleration / K. G. Tanaka [и др.] // Physics of Plasmas. — 2011. — Февраль. — Т. 18, № 2.
27. The structures of magnetic islands formed during collisionless magnetic reconnections in a force-free current sheet / F. Fan [и др.] // Physics of Plasmas. — 2016. — Ноябрь. — Т. 23, № 11.
28. *Hughes, W. J.* On the 3-dimensional structure of plasmoids / W. J. Hughes, D. G. Sibeck // Geophysical Research Letters. — 1987. — Июнь. — Т. 14, № 6. — С. 636–639.
29. Cluster observations of earthward flowing plasmoid in the tail / Q.-G. Zong [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2004. — Сентябрь. — Т. 31, № 18.
30. *Lin, J.* Plasmoids in reconnecting current sheets: Solar and terrestrial contexts compared / J. Lin, S. R. Cranmer, C. J. Farrugia // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — Ноябрь. — Т. 113, A11.
31. Acceleration of ions to suprathermal energies by turbulence in the plasmoid-like magnetic structures / E. E. Grigorenko [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2015. — Август. — Т. 120, № 8. — С. 6541–6558.
32. Magnetic holes in the solar wind / J. M. Turner [и др.] // Journal of Geophysical Research. — 1977. — Май. — Т. 82, № 13. — С. 1921–1924.
33. MMS Multipoint electric field observations of small-scale magnetic holes / K. A. Goodrich [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2016. — Июнь. — Т. 43, № 12. — С. 5953–5959.
34. Self-consistent kinetic model of nested electron- and ion-scale magnetic cavities in space plasmas / J.-H. Li [и др.] // Nature Communications. — 2020. — Ноябрь. — Т. 11, № 1.

35. Acceleration of trapped particles during a magnetic storm on April 18, 1965 / W. L. Brown [и др.] // *Journal of Geophysical Research*. — 1968. — Янв. — Т. 73, № 1. — С. 153–161.
36. *Fitzenreiter, R. J.* Structure of current sheets in magnetic holes at 1 AU / R. J. Fitzenreiter, L. F. Burlaga // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 1978. — Дек. — Т. 83, A12. — С. 5579–5585.
37. Magnetic dips in the solar wind / M. Dobrowolny [и др.] // *Solar Physics*. — 1979. — Май. — Т. 62, № 1. — С. 203–220.
38. Mirror mode waves: Messengers from the coronal heating region / C. T. Russell [и др.] // *Geophysical Research Letters*. — 2008. — Авг. — Т. 35, № 15.
39. *Amariutei, O. A.* Occurrence rate of magnetic holes between 0.72 and 1 AU: comparative study of Cluster and VEX data / O. A. Amariutei, S. N. Walker, T. L. Zhang // *Annales Geophysicae*. — 2011. — Май. — Т. 29, № 5. — С. 717–722.
40. Ulysses field and plasma observations of magnetic holes in the solar wind and their relation to mirror-mode structures / D. Winterhalter [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 1994. — Дек. — Т. 99, A12. — С. 23371–23381.
41. Cluster-C1 observations on the geometrical structure of linear magnetic holes in the solar wind at 1 AU / T. Xiao [и др.] // *Annales Geophysicae*. — 2010. — Сент. — Т. 28, № 9. — С. 1695–1702.
42. Statistical Properties of Sub-Ion Magnetic Holes in the Solar Wind at 1 AU / G. Q. Wang [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2020. — Окт. — Т. 125, № 10.
43. Case studies of mirror-mode structures observed by THEMIS in the near-Earth tail during substorms: THEMIS MIRROR-MODE STRUCTURES / Y. S. Ge [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2011. — Янв. — Т. 116, A1. — n/a–n/a.
44. MMS Observations of Kinetic-size Magnetic Holes in the Terrestrial Magnetotail Plasma Sheet / S. Y. Huang [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Апр. — Т. 875, № 2. — С. 113.
45. Magnetic holes in the vicinity of dipolarization fronts: Mirror or tearing structures? / M. A. Balikhin [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2012. — Авг. — Т. 117, A8.
46. Cluster and TC-1 observation of magnetic holes in the plasma sheet / W. J. Sun [и др.] // *Annales Geophysicae*. — 2012. — Март. — Т. 30, № 3. — С. 583–595.

47. *Soucek, J.* Properties of magnetosheath mirror modes observed by Cluster and their response to changes in plasma parameters / J. Soucek, E. Lucek, I. Dandouras // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — Апр. — Т. 113, A4.
48. *Sundberg, T.* Properties and origin of subproton-scale magnetic holes in the terrestrial plasma sheet / T. Sundberg, D. Burgess, C. T. Haynes // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2015. — Апр. — Т. 120, № 4. — С. 2600–2615.
49. Kinetics of sub-ion scale magnetic holes in the near-Earth plasma sheet / X.-J. Zhang [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2017. — Окт. — Т. 122, № 10.
50. An EMHD soliton model for small-scale magnetic holes in magnetospheric plasmas / Z.-Y. Li [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2016. — Май. — Т. 121, № 5. — С. 4180–4190.
51. The Geometry of an Electron Scale Magnetic Cavity in the Plasma Sheet / H. Liu [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2019. — Авг. — Т. 46, № 16. — С. 9308–9317.
52. Mirror mode waves in Venus’s magnetosheath: solar minimum vs. solar maximum / M. Volwerk [и др.] // Annales Geophysicae. — 2016. — Ноябрь. — Т. 34, № 11. — С. 1099–1108.
53. Evolution of mirror structures in the magnetosheath of Saturn from the bow shock to the magnetopause / M. B. Cattaneo [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1998. — Июнь. — Т. 103, A6. — С. 11961–11972.
54. Cassini observations of magnetic holes in the solar wind and Saturn magnetosheath / T. Karlsson [и др.]. — 2020. — Март.
55. Mirror mode structures in the Jovian magnetosheath / S. P. Joy [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2006. — Дек. — Т. 111, A12.
56. Mirror instability in the magnetosphere of comet Halley / C. T. Russell [и др.] // Geophysical Research Letters. — 1987. — Июнь. — Т. 14, № 6. — С. 644–647.
57. Mass-loading, pile-up, and mirror-mode waves at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko / M. Volwerk [и др.] // Annales Geophysicae. — 2016. — Янв. — Т. 34, № 1. — С. 1–15.
58. First observations of magnetic holes deep within the coma of a comet / F. Plaschke [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Окт. — Т. 618. — A114.

59. *Burlaga, L. F.* Trains of magnetic holes and magnetic humps in the heliosheath / L. F. Burlaga, N. F. Ness, M. H. Acuña // Geophysical Research Letters. — 2006. — Ноябрь. — Т. 33, № 21.
60. *Burlaga, L. F.* Linear magnetic holes in a unipolar region of the heliosheath observed by Voyager 1 / L. F. Burlaga, N. F. Ness, M. H. Acuña // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2007. — Июль. — Т. 112, A7.
61. Magnetosheath and heliosheath mirror mode structures, interplanetary magnetic decreases, and linear magnetic decreases: Differences and distinguishing features: REVIEW / B. T. Tsurutani [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2011. — Февр. — Т. 116, A2. — n/a—n/a.
62. Observations of kinetic-size magnetic holes in the magnetosheath / S. T. Yao [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2017. — Февр. — Т. 122, № 2. — С. 1990—2000.
63. MMS observations of electron scale magnetic cavity embedded in proton scale magnetic cavity / H. Liu [и др.] // Nature Communications. — 2019. — Март. — Т. 10, № 1.
64. *Morse, R. L.* Rigid Drift Model of High-Temperature Plasma Containment / R. L. Morse, J. P. Freidberg // The Physics of Fluids. — 1970. — Февр. — Т. 13, № 2. — С. 531—533.
65. *Davidson, G. T.* An improved empirical description of the bounce motion of trapped particles / G. T. Davidson // Journal of Geophysical Research. — 1976. — Авг. — Т. 81, № 22. — С. 4029—4030.
66. Magnetic field depression within electron holes / I. Y. Vasko [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2015. — Апр. — Т. 42, № 7. — С. 2123—2129.
67. *Roytershteyn, V.* Generation of magnetic holes in fully kinetic simulations of collisionless turbulence / V. Roytershteyn, H. Karimabadi, A. Roberts // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2015. — Май. — Т. 373, № 2041. — С. 20140151.
68. *Schamel, H.* Theory of Electron Holes / H. Schamel // Physica Scripta. — 1979. — Сент. — Т. 20, № 3/4. — С. 336—342.
69. A model of electromagnetic electron phase-space holes and its application: A MODEL OF EM EH AND ITS APPLICATION / J. B. Tao [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2011. — Ноябрь. — Т. 116, A11. — n/a—n/a.

70. *Burlaga, L. F.* Interplanetary magnetic holes: Theory / L. F. Burlaga, J. F. Lemaire // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1978. — Ноябрь. — Т. 83, А11. — С. 5157—5160.
71. *Johnson, J. R.* Global structure of mirror modes in the magnetosheath / J. R. Johnson, C. Z. Cheng // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1997. — Апрель. — Т. 102, А4. — С. 7179—7189.
72. Electron vortex magnetic holes: A nonlinear coherent plasma structure / С. Т. Haynes [и др.] // Physics of Plasmas. — 2015. — Январь. — Т. 22, № 1.
73. Coupling between whistler waves and slow-mode solitary waves / A. Tenerani [и др.] // Physics of Plasmas. — 2012. — Май. — Т. 19, № 5.
74. Cluster observations of whistler waves correlated with ion-scale magnetic structures during the 17 August 2003 substorm event / A. Tenerani [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2013. — Октябрь. — Т. 118, № 10. — С. 6072—6089.
75. *Goodrich, K. A.* Electric fields associated with small-scale magnetic holes in the plasma sheet: Evidence for electron currents / K. A. Goodrich, R. E. Ergun, J. E. Stawarz // Geophysical Research Letters. — 2016. — Июнь. — Т. 43, № 12. — С. 6044—6050.
76. Electron dynamics in a subproton-gyroscale magnetic hole / D. J. Gershman [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2016. — Май. — Т. 43, № 9. — С. 4112—4118.
77. Dipolarization fronts as a consequence of transient reconnection: In situ evidence / H. S. Fu [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2013. — Декабрь. — Т. 40, № 23. — С. 6023—6027.
78. Motion of the dipolarization front during a flow burst event observed by Cluster / R. Nakamura [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2002. — Октябрь. — Т. 29, № 20.
79. Neutral line model of substorms: Past results and present view / D. N. Baker [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1996. — Июнь. — Т. 101, А6. — С. 12975—13010.
80. *Nagai, T.* Magnetic Reconnection in the Near-Earth Magnetotail / T. Nagai, S. Machida // Geophysical Monograph Series. — American Geophysical Union, 03.2013. — С. 211—224.
81. An empirical model for the location and occurrence rate of near-Earth magnetotail reconnection / K. J. Genestreti [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2013. — Октябрь. — Т. 118, № 10. — С. 6389—6396.

82. *Ohtani, S.-i.* Temporal structure of the fast convective flow in the plasma sheet: Comparison between observations and two-fluid simulations / S.-i. Ohtani, M. A. Shay, T. Mukai // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2004. — Март. — Т. 109, A3.
83. THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front / A. Runov [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2009. — ИЮЛЬ. — Т. 36, № 14.
84. Kinetic structure of the sharp injection/dipolarization front in the flow-braking region / V. Sergeev [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2009. — Ноябрь. — Т. 36, № 21.
85. Statistical characteristics of particle injections throughout the equatorial magnetotail / C. Gabrielse [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Апрель. — Т. 119, № 4. — С. 2512–2535.
86. Average thermodynamic and spectral properties of plasma in and around dipolarizing flux bundles / A. Runov [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2015. — ИЮНЬ. — Т. 120, № 6. — С. 4369–4383.
87. *Baumjohann, W.* Average plasma properties in the central plasma sheet / W. Baumjohann, G. Paschmann, C. A. Cattell // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1989. — Т. 94, A6. — С. 6597–6606. — eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JA094iA06p06597>. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA094iA06p06597>.
88. Midnight radial profiles of the quiet and growth-phase plasma sheet: The Geotail observations / C.-P. Wang [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2004. — Дек. — Т. 109, A12.
89. Diversion of plasma due to high pressure in the inner magnetosphere during steady magnetospheric convection / J. Kissinger [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2012. — Май. — Т. 117, A5.
90. Origin of low proton-to-electron temperature ratio in the Earth's plasma sheet / E. E. Grigorenko [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2016. — Окт. — Т. 121, № 10. — С. 9985.
91. Plasma Jet Braking: Energy Dissipation and Nonadiabatic Electrons / Y. V. Khotyaintsev [и др.] // Physical Review Letters. — 2011. — Апрель. — Т. 106, № 16. — С. 165001.
92. Pitch angle distribution of suprathermal electrons behind dipolarization fronts: A statistical overview / H. S. Fu [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2012. — Дек. — Т. 117, A12.

93. *Zhang, X.* On the relationship of electrostatic cyclotron harmonic emissions with electron injections and dipolarization fronts / X. Zhang, V. Angelopoulos // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 2014. — Апр. — Т. 119, № 4. — С. 2536–2549.
94. Whistler mode waves at magnetotail dipolarization fronts / H. Viberg [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 2014. — Апр. — Т. 119, № 4. — С. 2605–2611.
95. Lower hybrid drift instability at a dipolarization front / A. Divin [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 2015. — Февр. — Т. 120, № 2. — С. 1124–1132.
96. Proton/electron temperature ratio in the magnetotail / A. V. Artemyev [и др.] // *Annales Geophysicae.* — 2011. — Дек. — Т. 29, № 12. — С. 2253–2257.
97. Spatial distributions of the ion to electron temperature ratio in the magnetosheath and plasma sheet / C.-P. Wang [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 2012. — Авг. — Т. 117, A8.
98. *Kuznetsov, E. A.* Dynamical Model for Nonlinear Mirror Modes near Threshold / E. A. Kuznetsov, T. Passot, P. L. Sulem // *Physical Review Letters.* — 2007. — Июнь. — Т. 98, № 23. — С. 235003.
99. Time scaling of the electron flux increase at GEO: The local energy diffusion model vs observations / M. A. Balikhin [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 2012. — Окт. — Т. 117, A10.
100. Radiation belt electron acceleration during the 17 March 2015 geomagnetic storm: Observations and simulations / W. Li [и др.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 2016. — Июнь. — Т. 121, № 6. — С. 5520–5536.
101. Variational approach for static mirror structures / E. A. Kuznetsov [и др.] // *Physics of Plasmas.* — 2015. — Апр. — Т. 22, № 4.
102. Particle Acceleration in the Magnetotail and Aurora / J. Birn [и др.] // *Space Science Reviews.* — 2012. — Апр. — Т. 173, № 1–4. — С. 49–102.
103. *Paschmann, G.* In-Situ Observations of Reconnection in Space / G. Paschmann, M. Øieroset, T. Phan // *Space Science Reviews.* — 2013. — Февр. — Т. 178, № 2–4. — С. 385–417.
104. *Vedenov, A.* Some properties of a plasma with an anisotropic ion velocity distribution in a magnetic field / A. Vedenov, R. Sagdeev // *Plasma Physics and the Problem of Controlled Thermonuclear Reactions, Volume 3.* — 1961. — Т. 3. — С. 332.

105. *Kivelson, M. G.* Mirror instability II: The mechanism of nonlinear saturation / M. G. Kivelson, D. J. Southwood // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1996. — Август. — Т. 101, А8. — С. 17365–17371.
106. Halo and mirror instabilities in the presence of finite Larmor radius effects / О. А. Pokhotelov [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2005. — Октябрь. — Т. 110, А10.
107. Nonlinear mirror mode dynamics: Simulations and modeling / F. Califano [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — Август. — Т. 113, А8.
108. Nonlinear mirror waves in non-Maxwellian space plasmas / О. А. Pokhotelov [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — Апрель. — Т. 113, А4.
109. Nature of Magnetic Holes above Ion Scales: A Mixture of Stable Slow Magnetosonic and Unstable Mirror Modes in a Double-polytropic Scenario? / L. Zhang [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2018. — Август. — Т. 864, № 1. — С. 35.
110. Oblique electron fire hose instability: Particle-in-cell simulations / P. Hellinger [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Январь. — Т. 119, № 1. — С. 59–68.
111. *Hellinger, P.* Electron mirror instability: particle-in-cell simulations / P. Hellinger, Š. Štverák // Journal of Plasma Physics. — 2018. — Июль. — Т. 84, № 4.
112. *Basu, B.* Field-Swelling Instability in Anisotropic Plasmas / B. Basu, B. Coppi // Physical Review Letters. — 1982. — Март. — Т. 48, № 12. — С. 799–801.
113. Electron Mirror-mode Structure: Magnetospheric Multiscale Observations / S. T. Yao [и др.] // The Astrophysical Journal Letters. — 2019. — Август. — Т. 881, № 2. — С. L31.
114. EMHD theory and observations of electron solitary waves in magnetotail plasmas / X.-F. Ji [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Июнь. — Т. 119, № 6. — С. 4281–4289.
115. Characteristics of ion distribution functions in dipolarizing flux bundles: Event studies / A. Runov [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2017. — Июнь. — Т. 122, № 6. — С. 5965–5978.
116. On the Acceleration and Anisotropy of Ions Within Magnetotail Dipolarizing Flux Bundles / X.-Z. Zhou [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2018. — Январь. — Т. 123, № 1. — С. 429–442.
117. Ion anisotropies in the magnetosheath / S. P. Gary [и др.] // Geophysical Research Letters. — 1993. — Сентябрь. — Т. 20, № 17. — С. 1767–1770.

118. Ion Anisotropy-driven waves in the Earth's magnetosheath and plasma depletion layer / R. E. Denton [и др.] // Geophysical Monograph Series. — American Geophysical Union, 1994. — С. 111–119.
119. Electron pitch angle/energy distribution in the magnetotail / A. V. Artemyev [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Сент. — Т. 119, № 9. — С. 7214–7227.
120. *Petviashvili, V.* Solitary Waves in Plasmas and in the Atmosphere / V. Petviashvili, O. Pokhotelov. — Gordon, Breach Science Publishers, 1992. — URL: <https://books.google.ru/books?id=5yTusPpJ6XUC>.
121. *Pritchett, P. L.* The kinetic ballooning/interchange instability as a source of dipolarization fronts and auroral streamers / P. L. Pritchett, F. V. Coroniti, Y. Nishimura // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Июнь. — Т. 119, № 6. — С. 4723–4739.
122. Observation of large-amplitude magnetosonic waves at dipolarization fronts / M. Zhou [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Июнь. — Т. 119, № 6. — С. 4335–4347.
123. Evolution of the lower hybrid drift instability at reconnection jet front / A. Divin [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2015. — Апр. — Т. 120, № 4. — С. 2675–2690.
124. *Aburdzhaniya, G.* Short-wavelength drift solitons / G. Aburdzhaniya, A. Mikhailovskii, S. Sharapov // Physics Letters A. — 1984. — Янв. — Т. 100, № 3. — С. 134–136.
125. *Shukla, P. K.* Magnetic solitons in nonuniform media / P. K. Shukla // Physical Review A. — 1989. — Май. — Т. 39, № 9. — С. 4758–4760.
126. *Baumgärtel, K.* Soliton approach to magnetic holes / K. Baumgärtel // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1999. — Дек. — Т. 104, A12. — С. 28295–28308.
127. Generation mechanism for magnetic holes in the solar wind / B. Buti [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2001. — Апр. — Т. 28, № 7. — С. 1355–1358.
128. Relationship between discontinuities, magnetic holes, magnetic decreases, and nonlinear Alfvén waves: Ulysses observations over the solar poles / B. T. Tsurutani [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2002. — Июнь. — Т. 29, № 11.

Шустов Павел Игоревич

Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

