

На правах рукописи



Шустов Павел Игоревич

Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: **Апатенков Сергей Вячеславович**,
кандидат физико-математических наук,
Санкт-Петербургский государственный университет, доцент

Мингалев Олег Викторович,
доктор физико-математических наук,
Полярный геофизический институт,
ведущий научный сотрудник, заведующий сектором

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита состоится 18 октября 2024 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 при Институте космических исследований Российской академии наук по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и по ссылке: <http://www.iki.rssi.ru/diss/2024/shustov.htm>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.481.01.

Автореферат разослан 12 сентября 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.481.01,
канд. физ.-мат. наук



Ткаченко Алексей Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Магнитные дыры представляют собой устойчивые, вихреподобные магнитоплазменные структуры, внутри которых локальный минимум давления магнитного поля компенсируется повышенным плазменным давлением. Впервые подробное описание наблюдения магнитных дыр и их изучение было представлено в работе [1] 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). В дальнейшем 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 [2]; в магнитосферах Земли и других планет [3; 4]; вокруг комет [5]; и в других областях гелиосферы вплоть до её границы [6]. Данные структуры являются крайне устойчивыми: магнитные дыры, образующиеся вблизи Меркурия и Венеры, могут сохраняться и переноситься потоком солнечного ветра до орбиты Земли [7] и даже Сатурна [2].

Пространственные масштабы магнитных дыр варьируются в очень широких пределах: от электронных дыр, характерный масштаб области минимума магнитного поля которых порядка нескольких электронных гирорадиусов [8], до гелиосферных ионных магнитных дыр с масштабами, превышающими 10^6 км. [1]. Структура магнитных дыр электронного масштаба полностью определяется кинетикой электронов, в то время как крупномасштабные магнитные дыры являются магнитогидродинамическими структурами.

Интересным и важным классом магнитных дыр является класс субионных магнитных дыр, пространственный масштаб которых порядка или меньше локального ионного гирорадиуса. Представители данного класса потенциально играют важную роль в энергообмене между популяциями ионов и электронов за счет вклада в энергетический каскад посредством возбуждения волновой активности на электронном масштабе [9]. Субионные магнитные дыры представляют большой интерес для изучения вследствие той роли, которую они играют в: генерации сильных холловских электрических полей [10; 11]; нагреве электронов и рассеянии частиц [12; 13]; ускорении заряженных частиц [14]; генерации сильных токов [12; 13; 15]. Исследованию магнитолазменных структур именно данного класса — субионных магнитных дыр, наблюдаемых в хвосте магнитосферы Земли, и посвящена данная работа.

Современные спутниковые данные свидетельствуют о наличии в хвосте магнитосферы Земли большого числа магнитных дыр данного

масштаба, ассоциированных, как правило, с прохождением фронта диполизации [16]. Фронт диполизации отделяет горячую разреженную плазму из области пересоединения от холодной фоновой плазмы [17]. Свойства фоновой плазмы довольно хорошо изучены [18], в то время как свойства горячей плазмы в диполизованном хвосте гораздо менее исследованы. 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 [15]. 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 [19; 20]. 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 передаче энергии магнитного поля в кинетическую и тепловую энергии именно ионов [21], а для объяснения нагрева электронной компоненты необходимы дополнительные механизмы. Таким образом, исследование нелинейной стадии эволюции неустойчивостей субионного масштаба (магнитных дыр) в диполизованном хвосте магнитосферы актуально для понимания процессов нагрева электронов.

Гибридный масштаб субионных магнитных дыр, наблюдаемых в хвосте магнитосферы, отличает их от подавляющего большинства магнитных дыр, наблюдаемых, например, в солнечном ветре [2] и магнитослое [22]. Считается, что магнитные дыры ионного масштаба в солнечном ветре и магнитослое образуются на нелинейной стадии протонной зеркальной неустойчивости [19]. Образование же субионных магнитных дыр в этих областях, как правило, объясняется развитием электронной зеркальной неустойчивости [23] или дрейфовой неустойчивости [24]. Однако данные о конфигурации плазмы и электромагнитных полей субионных магнитных дыр ставят под сомнение эти механизмы генерации [13; 15]. В магнитослое, заполненном перпендикулярно анизотропной плазмой от ударной волны солнечного ветра, электронная зеркальная неустойчивость [23] действительно может разумно объяснять образование субионных магнитных дыр; однако в хвосте магнитосферы Земли, заполненном продольно анизотропными электронами, этот тип плазменной неустойчивости вряд ли является причиной образования магнитных дыр. Дрейфовая же неустойчивость электронов может приводить к образованию магнитных дыр с пространственными масштабами, сравнимыми с пространственными масштабами наблюдаемых субионных магнитных дыр [13; 24], однако такие

структуры характеризуются повышением плотности плазмы и сильными электрическими полями [25; 26], в то время как наблюдаемые магнитные дыры не демонстрируют наличия сильных изменений плотности плазмы и электрических полей [13]. Существует также некоторое количество альтернативных моделей генерации магнитных дыр, построенных на рассмотрении нелинейных Альфвеновских волн и магнитозвуковых солитонов [27; 28], 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 волновых 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 [3; 15; 29]), 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 диполизационном 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 магнитосферных 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 диполизации, в область спокойной плазмы за фронтом (в область диполизованного хвоста). Горячая компонента электронов, локализованная внутри магнитных дыр, представляет собой неоднородность, с которой активно взаимодействуют 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 полей.

Помимо прочего, значимым научным результатом данной работы является детальное описание и изучение новой плазменной моды линейных колебаний трехкомпонентной плазмы (компонента ионов и две компоненты электронов с разными температурой и плотностью), 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 магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли связаны с развитием (баллонной/перестановочной) неустойчивостей горячей анизотропной популяции электронов на фронте диполизации, и обеспечивают перенос горячих электронов через фронт диполизации.
2. Разработаны двумерные кинетические и трехмерная магнитогидродинамическая модели магнитных дыр субионного масштаба, в рамках которых установлены ограничения на параметры данных нелинейных плазменных структур.
3. Обнаружена и исследована электромагнитная мода линейных колебаний в трехкомпонентной плазме (компонента ионов и две компоненты электронов с разными температурами и плотностями), характеристики которой соответствуют свойствам наблюдаемых субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы. Сравнение с данными спутниковых наблюдений показало, что найденная электронно-магнитозвуковая мода является наилучшим кандидатом на роль линейной стадии генерации субионных магнитных дыр.
4. Показано, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы могут являться источником мелкомасштабной структуры полярных сияний и, таким образом, поддерживать магнитосферно-ионосферную связь на малых (субионных) пространственных масштабах.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным подходом изучения объекта исследования, сочетающим 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, Creta, 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, 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.

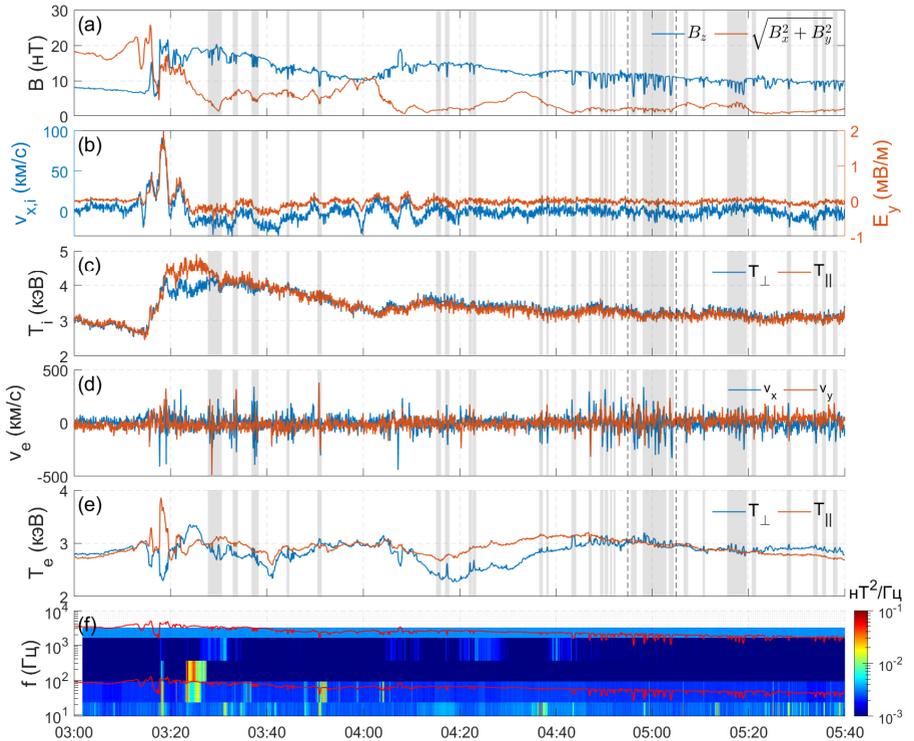


Рис. 1 — Событие диполизации по данным спутника THEMIS D от 17 февраля 2010 года: (a) магнитное поле; (b) скорость потока ионов $v_{x,ion}$ и электрическое поле $E_y = v_{x,ion}B_z/c$; (c) температуры ионов продольная и поперечная; (d) скорость электронов v_x и v_y ; (e) температуры электронов продольная и поперечная; (f) спектр магнитного поля. Серым цветом выделены пересечения магнитных дыр. Пунктирными вертикальными линиями выделен интервал для рисунка 2.

Содержание работы

Во введении обсуждается актуальность представляемой работы, ставятся цели и задачи, обосновывается новизна, вводятся понятия, необходимые для дальнейшего изложения, а также даются 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 миссии THEMIS.

В разделе 1.1 описан набор спутниковых данных миссии THEMIS, на основе которых далее ведется изучение субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы Земли. Представлены характеристики и ограничения

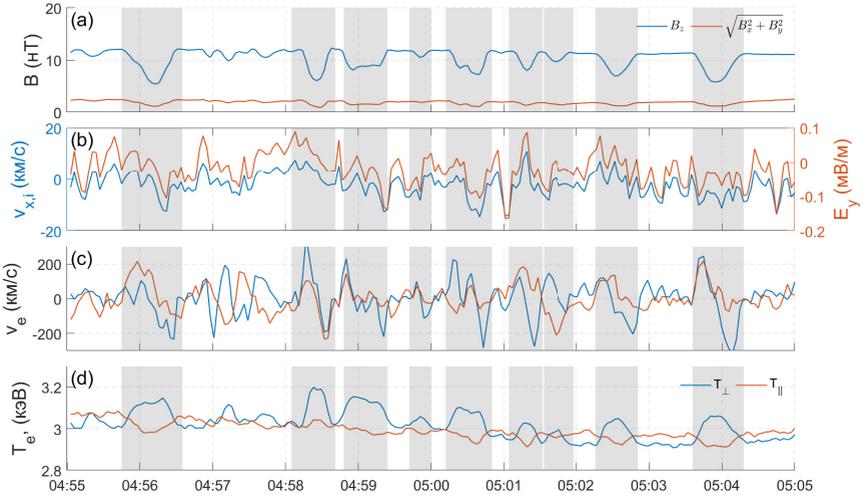


Рис. 2 — Подинтервал с рисунка 2: (а) магнитное поле; (б) скорость потока ионов $v_{x,ion}$ и электрическое поле $E_y = v_{x,ion}B_z/c$; (с) скорость электронов v_x и v_y ; (д) температуры электронов продольная и поперечная. Серым цветом выделены пересечения магнитных дыр.

используемых приборов. Далее, в разделе 1.2 описаны методики получения характеристик обнаруженных субионных магнитных дыр. В качестве примера представлено одно из событий диполизации, после которого наблюдается множество магнитных дыр. На рисунке 1 одно из событий диполизации с наблюдением субионных магнитных дыр после, а также на рисунке 2 изображен набор магнитных дыр в меньшем масштабе. В разделе 1.3 подробно изучены характеристики функции распределения электронов внутри магнитных дыр. Показано, что наблюдаемым субионным магнитным дырам соответствует горячая перпендикулярно анизотропная популяция электронов.

Далее, выдвигается гипотеза, что данная горячая компонента электронов была нагрета на фронте диполизации. Для тестирования этой гипотезы в разделе 1.4 выполнено моделирование нагрева электронов в процессе диполизации в адиабатическом приближении. Показано, что таким образом действительно можно получить перпендикулярно анизотропную горячую компоненту электронов. При этом подтверждено, что наблюдаемой степени диполизации хвоста достаточно для необходимого нагрева анизотропной популяции.

В разделе 1.5 детальное исследование наблюдаемых токов электронов внутри магнитных дыр и их сопоставление с вариацией магнитного поля, позволили показать наличие статистически значимого ненулевого дрейфа

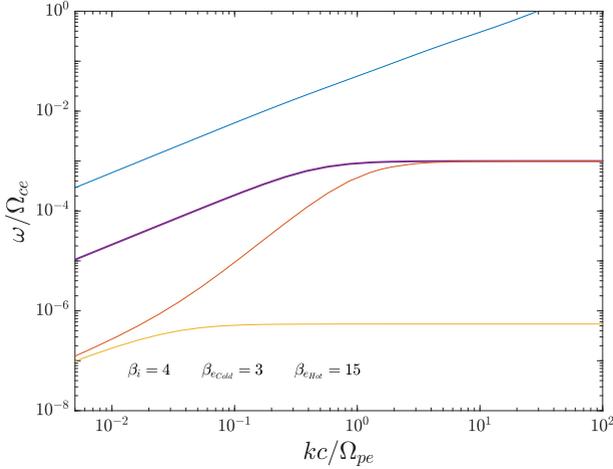


Рис. 3 — Дисперсионные кривые в случае трехкомпонентной плазмы (компонента ионов и две компоненты электроны с разной температурой). Помимо трех хорошо известных низкочастотных мод: быстрая (синим), промежуточная (красным) и медленная (желтым), также наблюдается новая, характерная именно этому набору компонент плазмы, линейная мода, изображенная фиолетовым цветом.

субионных магнитных дыр поперек хвоста магнитосферы в направлении утреннего фланга.

Для дополнительного подтверждения представленной в данной работе гипотезы образования субионных магнитных дыр на фронте диполизации в хвосте магнитосферы, в разделе 1.6 представлен анализ результатов PIC-моделирования фронта диполизации. В представленном моделировании действительно наблюдается процесс развития неустойчивости на фронте, которая приводит к образованию структуры, похожей на наблюдаемые магнитные дыры. В конце главы в разделе 1.7 обсуждаются полученные результаты, рассматривается трехмерная структура данных магнитных дыр, а также варианты их возможного взаимодействия с окружающей плазмой.

Во **второй главе** рассматриваются субионные магнитные дыры в контексте линейных мод магнитоплазменных возмущений. Исследуются линейные моды плазменных колебаний при наличии дополнительной горячей компоненты электронов (помимо фоновых компонент ионов и электронов), с целью найти моду, свойства которой (направление распространения, скорость, поляризация и возмущения плотности/температуры) соответствуют свойствам наблюдаемых субионных магнитных дыр.

Данная глава разделена на две части, в первой из которых (раздел 2.1) представлено подробное аналитическое исследование методами магнитогидродинамики. В частности, получена система уравнений и представлено аналитическое приближение её решения, в рамках которого действительно найдено выражение дисперсионного соотношения для новой моды линейных плазменных колебаний (в Приложении А приведен подробный вывод данного аналитического приближения).

Во второй части второй главы (раздел 2.2) представлено подробное численное исследование полученной новой моды линейных колебаний. Помимо построения дисперсионного соотношения (на рисунке 3 представлены дисперсионные кривые) и скоростей распространения таких волн, исследованы поляризация полей этой моды и амплитуды колебаний плотностей всех трех компонент плазмы. Показано, что все полученные свойства описанной моды линейных колебаний находятся в согласии с соответствующими характеристиками наблюдаемых магнитных дыр.

В конце данной главы в разделе 2.3 обсуждаются полученные результаты в контексте соответствия найденной моды и субионных магнитных дыр и дальнейшего их исследования с точки зрения данного подхода.

В **третьей главе** предложено несколько моделей субионных магнитных дыр. Данная глава разделена на две части.

В первой части данной главы (раздел 3.1) описано построение моделей магнитных дыр в кинетическом приближении в случае цилиндрической симметрии систем. В разделе 3.1.1 представлен вывод общих уравнений кинетики плазмы в случае цилиндрически симметричной системы с магнитным полем вдоль оси симметрии. Далее, для построения моделей используются два типа решений уравнений Власова: решение Харриса (раздел 3.1.2) и Николсона (раздел 3.1.3). Полученные модели действительно дают схожие с наблюдаемыми магнитными дырами профили магнитного поля и тока, но не электрического поля. Для решения проблемы экранирования электрического поля в уравнения вводится фоновая компонента плазмы (раздел 3.1.4). Из наблюдений известно, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли образованы только электронной компонентой плазмы, и не возмущают ионную компоненту. В рамках моделирования можно изучить влияние ионной компоненты на структуру магнитных дыр, что и сделано в разделе 3.1.5. Показано, что активное включение ионной компоненты приводит к образованию модельных структур, не согласующихся с наблюдаемыми субионными магнитными дырами. В разделе 3.1.6 обсуждаются результаты, полученные в процессе построения кинетических моделей магнитных дыр, а также отдельно представлено сравнение характеристик модельных дыр, полученных из решений Харриса и Николсона.

Во второй части третьей главы (раздел 3.2) представлено построение трехмерной магнитогидродинамической модели в приближении наличия

строгой иерархии пространственных масштабов магнитных дыр. В разделе 3.2.1 приведен вывод асимптотических приближений МГД уравнений с использованием потенциалов Эйлера и предположения иерархии масштабов. Далее, в разделе 3.2.2, отталкиваясь от известного одномерного решения, в первом приближении построено двухмерное решение, моделирующее магнитные дыры. В разделе 3.2.3, рассматривается следующее приближение, позволяющее получить полное трехмерное решение для магнитных дыр. Полученные модели магнитных дыр напоминают модели магнитных ловушек, а также демонстрируют наличие продольных магнитному полю токов. В разделе 3.2.4 обсуждаются результаты, полученные при построении модели магнитных дыр, рассматриваются варианты их дальнейшего развития и применения.

В четвертой главе устанавливаются взаимосвязи между субионными магнитными дырами в хвосте магнитосферы и мелкомасштабной структурой в оптических наблюдениях камер всего неба. Для данного сопоставления выбрано событие суббури 17 февраля 2010 в ходе которого было одновременное наблюдение полярного сияния камерами всего неба (см. рисунок 4) и субионных магнитных дыр спутниками THEMIS в области диполизованного хвоста магнитосферы магнитно сопряженной с камерами.

В разделе 4.1 представлены характеристики наблюдаемых субионных магнитных дыр, такие как частота наблюдения, пространственный масштаб, скорость и направление распространения. В разделе 4.2 приведены наблюдения с камер всего неба, на которых зафиксирован стример, соответствующий фронту диполизации, и после него наблюдается мелкомасштабная структура в сиянии. Построен спектр структур, изучены их пространственный масштаб, направления и скорости распространения. Анализ характеристик мелкомасштабных структур сияний, при их сопоставлении с характеристиками субионных магнитных дыр (с учетом магнитной проекции в хвост магнитосферы), позволил сделать вывод об их непосредственной взаимосвязи. В разделе 4.3 обсуждаются полученные в данной главе результаты, выдвигаются гипотезы о механизме взаимосвязи субионных магнитных дыр и наблюдаемой мелкомасштабной структуры сияния.

В заключении приводятся и обсуждаются основные результаты работы.

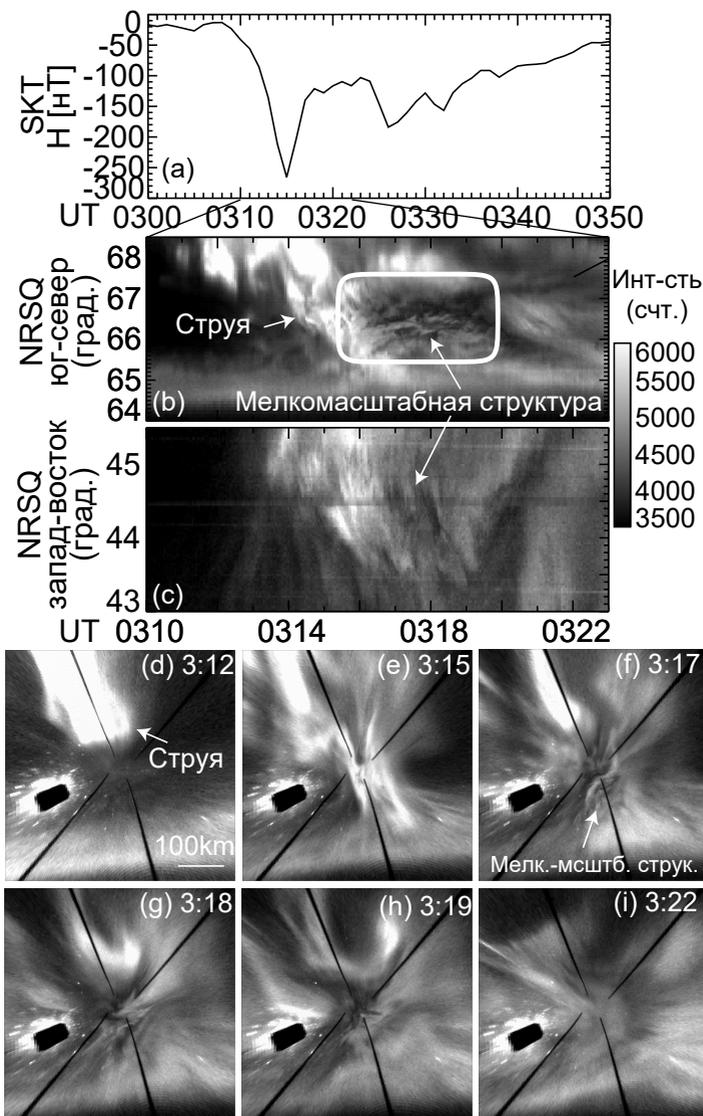


Рис. 4 — (a) Горизонтальная компонента данных наземного магнитометра на SKT. (b) кеограммы север-юг и (c) восток-запад по данным NRSQ THEMIS. (d-i) Примеры снимков с камер всего неба в различные моменты времени. Север — вверху, восток — справа. X-образные черные линии — это тени от антенн на площадке наблюдения.

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. Magnetic holes in the solar wind / J. M. Turner [и др.] // *Journal of Geophysical Research*. — 1977. — Май. — Т. 82, № 13. — С. 1921–1924.
2. Mirror mode waves: Messengers from the coronal heating region / C. T. Russell [и др.] // *Geophysical Research Letters*. — 2008. — Авг. — Т. 35, № 15.
3. 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.
4. 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.
5. Mirror instability in the magnetosphere of comet Halley / C. T. Russell [и др.] // *Geophysical Research Letters*. — 1987. — Июнь. — Т. 14, № 6. — С. 644–647.
6. *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.
7. *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.

8. Magnetic field depression within electron holes / I. Y. Vasko [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2015. — Апр. — Т. 42, № 7. — С. 2123–2129.
9. Coupling between whistler waves and slow-mode solitary waves / A. Tenerani [и др.] // Physics of Plasmas. — 2012. — Май. — Т. 19, № 5.
10. Electron vortex magnetic holes: A nonlinear coherent plasma structure / C. T. Haynes [и др.] // Physics of Plasmas. — 2015. — ЯНВ. — Т. 22, № 1.
11. *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.
12. Electron dynamics in a subproton-gyroscale magnetic hole / D. J. Gershman [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2016. — Май. — Т. 43, № 9. — С. 4112–4118.
13. 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.
14. *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.
15. 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.
16. Dipolarization fronts as a consequence of transient reconnection: In situ evidence / H. S. Fu [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2013. — Дек. — Т. 40, № 23. — С. 6023–6027.
17. 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.
18. 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.
19. *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.

20. 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.
21. Particle Acceleration in the Magnetotail and Aurora / J. Birn [и др.] // Space Science Reviews. — 2012. — Апр. — Т. 173, № 1–4. — С. 49–102.
22. *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.
23. *Hellinger, P.* Electron mirror instability: particle-in-cell simulations / P. Hellinger, Š. Štverák // Journal of Plasma Physics. — 2018. — Июль. — Т. 84, № 4.
24. 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.
25. *Aburdzhaniya, G.* Short-wavelength drift solitons / G. Aburdzhaniya, A. Mikhailovskii, S. Sharapov // Physics Letters A. — 1984. — Янв. — Т. 100, № 3. — С. 134–136.
26. *Shukla, P. K.* Magnetic solitons in nonuniform media / P. K. Shukla // Physical Review A. — 1989. — Май. — Т. 39, № 9. — С. 4758–4760.
27. *Baumgärtel, K.* Soliton approach to magnetic holes / K. Baumgärtel // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1999. — Дек. — Т. 104, A12. — С. 28295–28308.
28. Generation mechanism for magnetic holes in the solar wind / B. Buti [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2001. — Апр. — Т. 28, № 7. — С. 1355–1358.
29. 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.