

На правах рукописи



Лукин Александр Сергеевич

# КИНЕТИКА НОЧНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Специальность 1.3.1 —  
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

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: чл.-корр. РАН, доктор физико-математических наук  
**Петрукович Анатолий Алексеевич**

Официальные оппоненты: **Демехов Андрей Геннадьевич**,  
Доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Полярный геофизический институт" (ПГИ),  
Главный научный сотрудник

**Апатенков Сергей Вячеславович**,  
Кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет" (СПбГУ),  
Доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Защита состоится 22 сентября 2023 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 на базе Института 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 на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2023/lukin.htm>.

Автореферат разослан 15 августа 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

24.1.481.01, канд. физ.-мат. наук



Ткаченко Алексей Юрьевич

## Общая характеристика работы

Магнитопауза – граница магнитосферы Земли (см. левую панель Рисунка 1), которая отделяет области пространства, заполненные потоком холодной плазмы солнечного ветра (плазма магнитослоя), от областей, заполненных горячей магнитосферной плазмой на низких широтах (плазменный слой около магнитного экватора) и сильным магнитным полем на высоких широтах (магнитосферные лобы). Структура и динамика магнитопаузы определяет механизмы транспорта плазмы солнечного ветра в магнитосферу [5] и, как следствие, исследование магнитопаузы крайне важно для описания и моделирования процессов взаимодействия солнечного ветра и земной магнитосферы.

Наиболее изученной, как с точки зрения спутниковых наблюдений, так и с точки зрения теоретических исследований, является структура дневной и околоземной фланговой магнитопаузы, большое количество материала по которым было предоставлено спутниковыми миссиями, включая Interball, Geotail, Cluster, THEMIS, MMS. Гораздо меньше известно о ночной магнитопаузе на больших радиальных расстояниях от Земли, спутниковые данные для которой до недавнего времени были представлены лишь несколькими пролётами ISEE-3 и Geotail. При этом основная плазменная популяция хвостовой области магнитосферы сформирована именно за счёт транспорта плазмы магнитослоя через ночную дальнюю магнитопаузу, а последующая конвекция к Земле и нагрев этой плазмы обеспечивают основную популяцию горячих частиц в ближней хвостовой области магнитосферы Земли, откуда эти частицы инжектируются во внутреннюю магнитосферу, создавая популяции кольцевого тока и внешнего радиационного пояса. Лишь с запуском спутниковой миссии ARTEMIS [6] в 2010 году появилась возможность изучения свойств ночной магнитопаузы на больших радиальных расстояниях (миссия работает на лунной орбите,  $\sim 60R_E$  на ночной стороне,  $R_E = 6371$  км – радиус Земли), а после 2016 года спутники миссии MMS [7] вышли на околоэкваториальную орбиту с апогеем  $\sim 35R_E$  и, как следствие, регулярно наблюдают ночную околоземную магнитопаузу, позволяя тем самым провести сопоставление структуры магнитопаузы на разных радиальных расстояниях (путем сравнения данных измерений MMS и ARTEMIS).

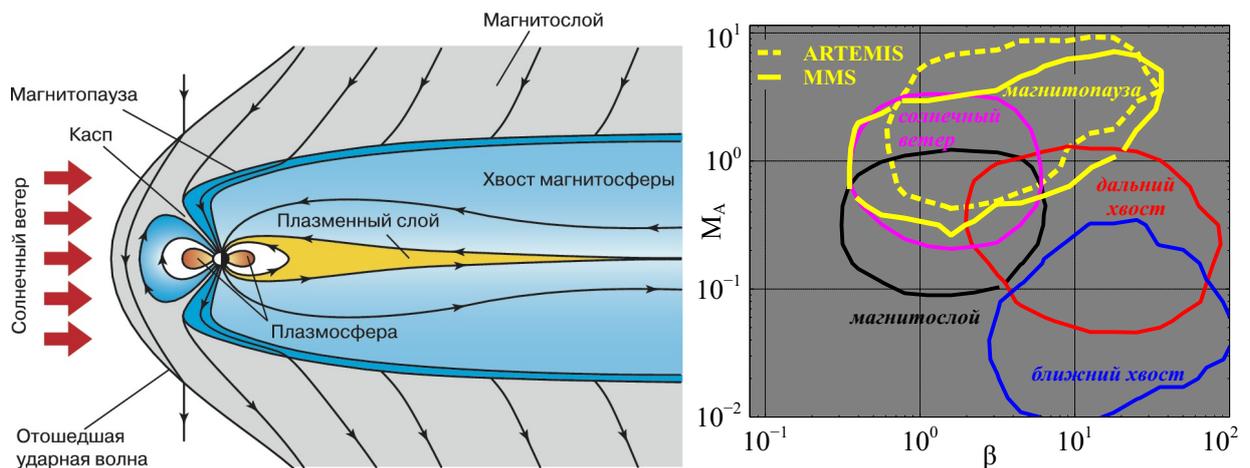


Рис. 1 — Левая панель – схематичное изображение магнитосферы Земли, проекция на плоскость, перпендикулярную плоскости эклиптики и проходящую через линию Земля-Солнце. Рисунок с сайта geography-a.ru. Правая панель – параметрические области, которые занимают токовые слои в солнечном ветре (розовый), в магнитослое (черный), околоземном магнитосферном хвосте (синий), в магнитосферном хвосте на лунной орбите (красный), на околоземной (жёлтая сплошная линия) и дальней (жёлтая пунктирная линия) магнитопаузе.

Ключевым элементом магнитопаузы – её токовый слой, представляющий собой двумерную, локально одномерную плазменную структуру с высокой плотностью тока, ответственной за вариацию магнитного поля поперёк магнитопаузы [8]. Наиболее важным свойством токового слоя является его устойчивость к внешним воздействиям или собственным неустойчивостям, ведь именно это свойство определяет динамику слоя, ответственную, в частности, за возможность транспорта частиц через магнитные поверхности токового слоя. Устойчивость токовых слоёв в целом определяется их конфигурацией. В простейшей геометрии магнитного поля токовый слой представляет собой одномерную (1D) структуру, которая описывается моделью либо тангенциального разрыва, разделяющего две плазмы с различными свойствами, либо вращательного разрыва, характеризующегося конечной составляющей магнитного поля  $B_n$  в направлении по нормали к поверхности слоя (то есть к поверхности магнитопаузы).

Первичное представление о структуре токовых слоёв магнитопаузы можно получить, рассматривая область, которую данные слои занимают в параметрическом пространстве, сформированном двумя наиболее важными

плазменными параметрами: числом Маха  $M_A$  (отношение скорости потока плазмы к скорости Альфвена) и плазменным бета  $\beta$  (отношение теплового давления плазмы к давлению магнитного поля). На правой панели рисунка 1 показаны области параметров, соответствующие токовым слоям, наблюдаемым в различных плазменных системах, в том числе токовым слоям фланговой магнитопаузы на близких к Земле расстояниях (наблюдения спутниковой миссии MMS) и на лунной орбите (наблюдения спутниковой миссии ARTEMIS). Эти параметрические области отличаются большими числами Маха, что соответствует быстрым плазменным потокам при малых Альфвеновских скоростях. Однако основной поток параллелен поверхности магнитопаузы и не вносит существенного вклада в баланс давления [9]. Таким образом, токовые слои фланговой магнитопаузы сбалансированы либо градиентами плазменного давления, либо являются бессиловыми конфигурациями с доминированием параллельных токов. Диапазон  $\beta$  для токовых слоёв магнитопаузы крайне широк и покрывает как диапазон, соответствующий слоям солнечного ветра, так и диапазон, соответствующий слоям магнитосферного хвоста. Таким образом, можно ожидать, что токовые слои фланговой магнитопаузы характеризуются широким набором возможных конфигураций магнитного поля.

## **Актуальность темы исследования**

Актуальность работы обусловлена комбинацией нескольких факторов: во-первых, важной ролью, которую ночная магнитопауза (а точнее ее токовый слой) играет в транспорте заряженных частиц солнечного ветра в магнитосферу Земли, и уникальной ситуацией с доступными данными спутниковых измерений, которая сложилась благодаря нескольким годам одновременного мониторинга ночной магнитопаузы двумя многоспутниковыми миссиями - MMS и ARTEMIS. Наблюдения миссии ARTEMIS, с 2010 года работающей на лунной орбите, впервые позволяют провести статистический анализ свойств ночной фланговой магнитопаузы Земли на больших радиальных расстояниях, а совместные наблюдения миссий ARTEMIS и MMS позволяют изучить вариацию структуры ночной магнитопаузы с изменением радиального расстояния от планеты.

Во-вторых, помимо важности структуры токового слоя магнитопаузы в контексте его устойчивости и транспорта частиц, следует отметить, что фланговая магнитопауза – наиболее доступная для исследования система с токовыми слоями с малыми величинами  $\beta$  и малым вкладом динамического давления плазмы. Как следствие, она представляет собой идеальную систему для статистического изучения бессиловых конфигураций токового слоя. Помимо фланговой магнитопаузы данный класс токовых слоев наблюдается в солнечном ветре, в дальнем хвосте магнитосферы Земли, в холодной плазме хвоста магнитосферы Марса [10] и плазме малой плотности хвоста магнитосферы Юпитера [11]. Таким образом, фланговая магнитопауза является естественной лабораторией по изучению редкого в магнитосфере Земли, но распространённого в гелиосфере класса токовых слоёв.

## Цели и задачи работы

Основной целью диссертационной работы является детальное изучение кинетической структуры токового слоя фланговой ночной магнитопаузы.

Основные задачи работы:

1. Исследование пространственных масштабов и плазменных популяций ночной магнитопаузы на больших радиальных расстояниях. Решение данной задачи должно дать представление о структуре переходных областей плазмы и токового слоя ночной фланговой магнитопаузы – ключевого элемента границы между плазменными популяциями магнитосферы и магнитослоя, определяющего свойства транспорта плазмы через магнитопаузу.
2. Исследование вариации структуры ночной фланговой магнитопаузы с радиальным расстоянием. Решение данной задачи должно дать количественную оценку изменения толщины токового слоя магнитопаузы и его конфигурации при увеличении расстояния от Земли.
3. Теоретическое исследование структуры токового слоя ночной фланговой магнитопаузы. Решение этой задачи должно дать ответ о существовании стационарных конфигураций токового слоя или о необходимости построения его динамических моделей.

## Научная новизна

Новизна основных результатов, полученных в рамках диссертационной работы, обусловлена следующими факторами:

1. Собранная и использованная статистика наблюдений ночной магнитопаузы спутниковой миссией ARTEMIS не имеет аналогов в литературе. Сама возможность сбора такого набора данных появилась лишь в последнее десятилетие, что автоматически делает полученные в рамках его анализа результаты новыми.
2. Аналогичная ситуация имеет место и со статистикой одновременных наблюдений MMS и ARTEMIS, сама возможность сбора которых появилась лишь после 2016 года и была впервые использована в исследованиях, лежащих в основе данной диссертационной работы. Как следствие, полученные по обоим наборам данных результаты не имеют прямых аналогов в литературе и являются абсолютно новыми.
3. Использованный в третьей главе алгоритм машинного обучения, разработанный для поиска инвариантов движения частиц в Гамильтоновых системах, ранее не применялся к задачам о динамике ионов в токовых слоях, т.е. новизна полученных и представленных в третьей главе результатов обеспечена использованием инновационных теоретических подходов к решению задачи о существовании стационарных плазменных равновесий.

## Теоретическая и практическая значимость работы

Можно выделить следующие основные аспекты, определяющие значимость полученных результатов: (I) Впервые проведен статистический анализ свойств фланговой ночной магнитопаузы Земли по данным спутниковой миссии ARTEMIS, и показано, что на больших расстояниях от планеты магнитопауза представляет собой многомасштабную структуру, состоящую из переходных слоёв плотности, температуры и кинетической энергии плазмы различной толщины, с характерными масштабами порядка 3000 км, сопоставимыми с гирорадиусом ионов плазменного слоя. Этот результат может иметь

определяющее значение для построения моделей устойчивости токового слоя магнитопаузы и транспорта плазмы солнечного ветра в магнитосферу.

(II) Приведенные в первой главе результаты показывают, что отношение ионной и электронной температур поперек магнитопаузы на лунной орбите остается постоянным  $T_i/T_e \approx 5 - 10$ , и транспорт плазмы из магнитослоя в плазменный слой на лунной орбите может объяснить отношение  $T_i/T_e$  для холодного плазменного слоя. Этот результат указывает на то, что низкочастотные флуктуации магнитного поля, наблюдаемые в магнитослое, могут вносить существенный вклад в динамику частиц вблизи магнитопаузы и приводить к термализации ионной популяции магнитослоя. Значимость этого результата состоит в прямом экспериментальном подтверждении необходимости учета низкочастотных электромагнитных колебаний при моделировании динамики частиц вблизи магнитопаузы.

(III) Впервые проведен статистический анализ сопряженных наблюдений магнитопаузы Земли миссиями ARTEMIS и MMS. Показано, что токовый слой ночной магнитопаузы на разных радиальных расстояниях представляет собой самоподобную кинетическую структуру: конфигурация магнитного поля и толщина токового слоя, измеренная в масштабах тепловых гирорадиусов протонов магнитосферы, остаются неизменными в диапазоне радиальных расстояний от 10 до 60 радиусов Земли. Как следствие магнитопауза как в ближнем, так и в дальнем хвосте может быть описана одним и тем же классом моделей токовых слоёв. Основная значимость полученных результатов состоит в существенном ограничении класса теоретических подходов, применимых для моделирования процессов вблизи магнитопаузы: типичные пространственные масштабы токового слоя магнитопаузы и переходных областей плазменных параметров сопоставимы с гирорадиусом ионов магнитосферы, т.е. для аккуратного описания динамики частиц вблизи магнитопаузы необходимо использовать кинетические или гибридные модели.

(IV) Впервые для анализа динамики ионов в токовом слое ночной магнитопаузы применен метод машинного обучения AI Poincaré и показано, что для работы алгоритма вместо численно рассчитанных траекторий частиц можно использовать соответствующие им сечения Пуанкаре. Основным результатом данного анализа состоит в том, что в присутствии нормальной к поверхности магнитопаузы компоненты магнитного поля ее токовый слой

необходимо описывать динамическим равновесием, в то время как статических равновесий, существующих на длительных временных интервалах, по видимому, не существует. Значимость этого результата определяется ролью токового слоя в транспорте частиц солнечного ветра в магнитосферу. Кроме того, дополнительную ценность полученным результатам придаёт тот факт, что конфигурация токового слоя магнитопаузы является универсальной для ряда плазменных систем, и, в частности, повторяет конфигурацию кинетических токовых слоёв солнечного ветра, магнитослоя и хвостовых областей магнитосфер Марса и Юпитера.

## **Методология и методы исследования**

В диссертационной работе использовались как стандартные и верифицированные одно- и много-спутниковые методы анализа структуры токовых слоев, так и специально разработанные для целей работы методы анализа плазменных границ в отсутствии чётких градиентов магнитных полей: вариационный анализ вектора магнитного поля (MVAB), DeHoffmann-Teller анализ (dHT), минимизация отклонения от закона Фарадея (MFR), композиционный метод (COM), метод тайминга Constant Velocity Approach (CVA) и метод курлометра (см. [12; 13]). Все аппроксимации данных аналитическими функциями проводились с использованием метода наименьших квадратов (МНК). Для численных расчетов траекторий частиц применялся метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Для обучения нейронных сетей использовался алгоритм обратного распространения ошибки [14] с оптимизатором Adam [15] и условием ранней остановки.

## **Результаты и положения, выносимые на защиту**

1. Впервые проведен статистический анализ многоспутниковых наблюдений ночной фланговой магнитопаузы на лунной орбите, и показано, что магнитопауза и низкоширотный пограничный слой представляют собой многомасштабную структуру, состоящую из переходных слоёв плотности, температуры и кинетической энергии плазмы. Толщины слоёв различных плазменных характеристик не совпадают, но их характерный масштаб определяется масштабом

гирорадиуса протонов плазменного слоя и составляет порядка 3000 км. Обнаружено сохранение суммы тепловой и потоковой энергии ионов и сохранение отношения ионной и электронной температур поперёк ночной магнитопаузы, что указывает на доминирующую роль низкочастотных флуктуаций магнитного поля в транспорте плазмы магнитослоя в магнитосферу.

2. Впервые проведен статистический анализ сопряжённых наблюдений фланговой магнитопаузы двумя спутниковыми миссиями, разнесёнными на расстояния в несколько десятков радиусов Земли, и экспериментально показано, что токовый слой ночной магнитопаузы на разных радиальных расстояниях представляет собой самоподобную кинетическую структуру: толщина токового слоя, измеренная в масштабах тепловых гирорадиусов протонов магнитосферы, и конфигурация магнитного поля остаются неизменными в диапазоне радиальных расстояний от 10 до 60 радиусов Земли.
3. Анализ динамики ионов в токовом слое ночной магнитопаузы, проведенный с использованием алгоритмов машинного обучения, показал, что для широкого диапазона конфигураций магнитного поля не существует достаточного для построения стационарной кинетической модели токового слоя количества инвариантов движения протонов. Т.е. токовый слой ночной магнитопаузы в присутствии нормальной к поверхности магнитопаузы компоненты магнитного поля описывается динамическим равновесием и не может быть описан стационарной кинетической моделью.

## **Достоверность результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена использованием надёжно апробированных методов обработки спутниковых данных и специального программного обеспечения (SPEDAS, см. [16]). Адекватность работы численных кодов была проверена на примерах задач, имеющих известные решения. Все полученные в рамках диссертации результаты согласуются с результатами опубликованных ранее научных работ других авторов. Дополнительно стоит отметить, что:

- При использовании метода курлометра дополнительно проверялось, что конфигурация взаимного расположения спутников миссии MMS обеспечивала необходимые условия применимости метода [12].
- При использовании одно-спутниковых вариационных методов восстановления локальной системы координат дополнительно проверялось выполнение условий  $\lambda_2/\lambda_3 > 3$  на собственные значения матриц вариации каждого из методов, что обеспечило достаточную точность определения нормали к рассматриваемой структуре.
- В рамках обучения нейронных сетей была проведена серия экспериментов по подбору наиболее подходящей архитектуры.
- В процессе обучения нейронных сетей использовался метод ранней остановки, что позволило избежать переобучения.

## Апробация работы

Результаты исследований, вошедших в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на научно-исследовательских семинарах Института Космических Исследований Австрийской Академии Наук (IWF ÖAW). Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе:

- Ежегодной конференции "Физика плазмы в солнечной системе"(ИКИ РАН, Москва, Россия, 2018, 2019)
- Ежегодном семинаре "Физика Авроральных явлений"(Апатиты, Россия, 2018, 2019, 2022)
- Конференции "5th Cluster-THEMIS workshop"(Chania, Crete, Greece, 2018)
- Конференции "European Geosciences Union General Assembly"(Vienna, Austria, 2018, 2019)
- Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике "Физические процессы в космосе и околоземной среде XVI Конференции молодых ученых, "Взаимодействие полей и излучения с веществом"(Иркутск, Россия, 2019)
- Конференции "29th Cluster workshop"(Lanzarote, Canary Island, Spain, 2019)

- Международном молодежном научном форуме "Ломоносов"(МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 2020)

## Публикации и личный вклад автора

Положения, выносимые на защиту, основаны на работах из списка публикаций автора по теме диссертации, вклад автора в которые является основным. Всего соискателем опубликовано 12 статей в рецензируемых международных журналах из перечня ВАК, включая 8 статей в журналах второго квартиля (Q2) международной базы Web of Science (WoS). Работы, не указанные в списке публикаций автора по теме диссертации, были подготовлены в рамках смежных тем, не относящихся к теме диссертационной работы.

Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично автором диссертации. Физические постановки задач, рассмотренных в диссертационной работе, принадлежат научному руководителю, а исследования и результаты – соискателю. Соискателем осуществлялись: сбор и обработка данных, проведение расчетов, математическая постановка задач, написание и тестирование программ для обработки данных и численных расчетов, обучение нейронных сетей, анализ полученных результатов, подготовка и написание текстов публикаций, взаимодействие с рецензентами и редакторами в процессе публикации статей.

## Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы исследования и научная новизна результатов, их достоверность и практическая значимость, сформулированы цели и задачи работы, перечислены положения, выносимые на защиту, описаны приборы и методы, использованные при работе с данными спутниковых миссий ARTEMIS и MMS, и дано краткое изложение структуры диссертации.

В Главе 1 проведено исследование структуры ночной магнитопаузы Земли на лунной орбите (на радиальных расстояниях  $\sim 50R_E$  от планеты) по данным спутниковой миссии ARTEMIS.

В разделе 1.1 представлено введение к главе 1: описаны различия дневной и ночной магнитопаузы, сформулированы цели исследования, проведенного в данной главе.

В разделе 1.2 описана процедура сбора статистики пересечений спутниками ночной магнитопаузы. Указаны используемые приборы миссии ARTEMIS и их характеристики. Приведены основные критерии отбора данных и метод определения скорости магнитопаузы и нормали к ее поверхности. Показаны типичные примеры отобранных пересечений, и приведена информация о всем используемом в дальнейшем наборе данных.

В разделе 1.3 представлен анализ пространственных масштабов переходных областей (градиентов) плазменных параметров вблизи ночной магнитопаузы. Описана процедура определения толщины переходных слоев плотности  $L_n$ , температуры  $L_T$  и кинетической энергии  $L_E$  ионов. Рассмотрена статистика распределения толщин переходных областей плазменных параметров. Показано, что данные толщины могут отличаться для разных плазменных параметров, т.е. ночная магнитопауза, как правило, имеет многомасштабную структуру, где пространственная область изменения плотности вложена в область изменения температуры (или наоборот). Такие вложенные плазменные структуры наблюдались в плазме с несколькими ионными популяциями или в многокомпонентной плазме (см. обсуждение данного вопроса в работе [17]). Также показано, что области градиентов плотности и температуры обычно смещены друг относительно друга на величину порядка  $0.1 - 0.5R_E$ . Такая конфигурация воспроизводит результаты, полученные для дневной магнитопаузы в работах [18], в которых токовый слой (пространственно локализованное вращение вектора магнитного поля) часто сдвинут относительно пограничных слоев плазменных параметров (область изменения плотности, температуры и кинетической энергии частиц). Показано, что данные области имеют типичный масштаб порядка  $L_{n,T,E} \sim 0.5R_E \sim 3000\text{км}$ , сопоставимый со значениями теплового гирорадиуса ионов плазменного слоя,  $L \sim 1 - 2\rho_i^{PS}$ , при этом  $L/\rho_i^{PS}$  для ночной магнитопаузы меньше, чем аналогичный параметр для дневной магнитопаузы [19].

В разделе 1.4 рассмотрена вариация полной энергии ионов и электронов вблизи магнитопаузы на лунной орбите. Для определения различий между характерами изменения температур обеих популяций частиц при дви-

жении поперек магнитопаузы, профили зависимости  $T_i(T_e)$  были аппроксимированы степенной функцией  $T_i = \alpha T_e^\gamma$ . Показано, что большинство событий имеет показатель  $\gamma \sim 1$ , т.е. ионная и электронная температуры изменяются одинаковым образом, а их отношение остается постоянным:  $T_i/T_e \sim [5 - 10]$ . Аналогичное отношение  $T_i/T_e \sim 7$  (при  $\gamma = 1$ ) часто наблюдается в холодной плазме плазменного слоя [20]. Таким образом, транспорт плазмы из магнитослоя в плазменный слой на лунной орбите может объяснить отношение  $T_i/T_e$  для холодного плазменного слоя, но более эффективный нагрев электронов во время конвекции к Земле будет изменять показатель  $\gamma$  (от  $\gamma \sim 1$  до  $\gamma \sim 1/2$ ), и в горячем плазменном слое ближнего хвоста магнитосферы можно наблюдать  $T_i/T_e < 3$  [21; 22].

Рассмотрена зависимость полной энергии (суммы температуры и кинетической энергии) частиц в плазменном слое от их полной энергии в магнитослое (Рисунок 2). Показано, что нет существенного отличия в энергии ионов по обе стороны от магнитопаузы, т.е. энергии до и после пересечения близки и хорошо коррелируют. В отличие от ионной популяции, энергия электронов в плазменном слое значительно выше, чем в магнитослое, т.е. полученные результаты подтверждают гипотезу о существовании энерго-селективного механизма транспорта электронов через ночную магнитопаузу.

В **разделе 1.5** приводится заключение главы 1, где сформулированы основные результаты и выводы.

В **Главе 2** рассматривается совместная статистика близких во времени пересечений ночной магнитопаузы Земли спутниками миссий MMS и ARTEMIS. Исследуются различия в пространственных масштабах и структуре токового слоя магнитопаузы  $L_B$  и переходных областей плазменных параметров (плотности  $L_n$ , потоковой скорости  $L_V$  и температуры  $L_T$  ионов).

В **разделе 2.1** приведено введение: указаны причины, которые могут приводить к различию свойств и структуры фланговой магнитопаузы на различных расстояниях от планеты. Сформулированы цели и задачи исследования, проведенного в рамках данной главы.

В **разделе 2.2** описан процесс сбора совместной статистики близких во времени пересечений ночной фланговой магнитопаузы спутниками миссий MMS и ARTEMIS. Указаны основные критерии, использованные при отборе данных. Описанные используемые приборы и их характеристики. Приведены

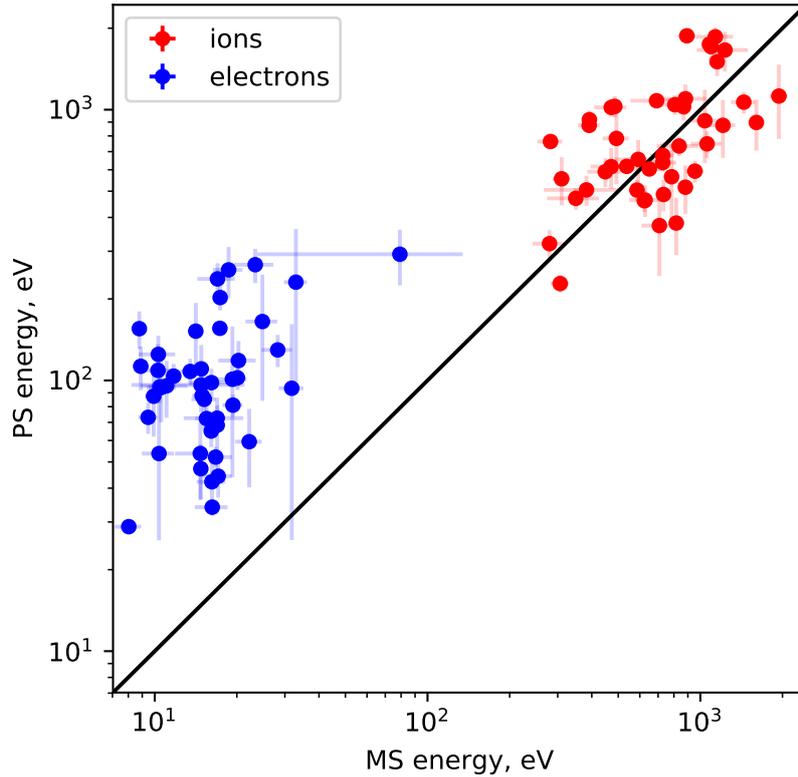


Рис. 2 — Сравнение полной энергии (кинетической энергии и температуры) ионов и электронов в магнитослое и плазменном слое.

графики и таблицы, содержащие сводную информацию о всех отобранных временных интервалах, а также показаны примеры событий из отобранной статистики.

В разделе 2.3 описаны методы оценки пространственных масштабов магнитопаузы ( $L_B$ ,  $L_n$ ,  $L_V$  и  $L_T$ ). Перечислены используемые методы определения скорости движения и восстановления локальной системы координат магнитопаузы. Описана процедура расчета толщины токового слоя и переходных областей плазменных параметров.

В разделе 2.4 приведен анализ и сравнение пространственных масштабов магнитопаузы вблизи Земли и на лунной орбите. Показано, что пространственные масштабы градиентов увеличиваются на 10 – 30% при увеличении расстояния от Земли (от орбиты MMS до лунной орбиты). Данная разница много меньше, чем диапазон вариации толщин по данным обеих миссий, т.е. при удалении от Земли наблюдается крайне небольшое увеличение толщин токового слоя и переходных слоев плазменных параметров. Далее приведена процедура оценки теплового гирорадиуса ионов плазменного слоя  $\rho_i$ . Рассмотрены распределения пространственных масштабов магнитопаузы,

нормированных на значение  $\rho_i$ . Показано, что распределения нормализованных толщин токового слоя хорошо согласуются для двух наборов пересечений по данным MMS и ARTEMIS, а среднее значение составляет порядка  $L_B \sim 2.65 - 2.74\rho_i$ . Нормированные значения толщин переходных слоев плазменных параметров напротив, заметно больше вблизи Земли (набор данных миссии MMS). Этот результат указывает на то, что толщина токового слоя магнитопаузы изменяется в соответствии с изменением гирорадиуса ионов плазменного слоя, в то время как пространственные масштабы переходных областей плазменных параметров контролируются свойствами как плазмы магнитосферы, так и плазмы магнитослоя.

Рассмотрена вариация амплитуды плотности тока  $J \approx \Delta B_L / L_B$  (где  $\Delta B_L$  – изменение  $L$ -компоненты магнитного поля поперек токового слоя), текущего через токовый слой магнитопаузы. Показано, что наблюдается существенное уменьшение амплитуды плотности тока с увеличением радиального расстояния от Земли, согласующееся с уменьшением амплитуды магнитного поля. Данный результат подтверждает вывод о слабой вариации толщины токового слоя магнитопаузы при увеличении радиального расстояния от планеты.

В разделе 2.5 показано, что на лунной орбите баланс давления поперёк токового слоя магнитопаузы выполняется в основном за счет теплового давления, а вблизи Земли – за счет суммы теплового и магнитного давлений, а вклад динамического давления плазмы магнитослоя крайне мал. Для статистики наблюдений миссии MMS условие баланса давления выполняется точнее, чем для статистики наблюдений ARTEMIS, для которых давление в магнитослое обычно больше, чем давление в магнитосфере. Это может быть связано с наличием сильных альфвеновских флуктуаций магнитного поля, наблюдаемых в магнитослое в присутствии слабого фонового поля на лунной орбите (данный вопрос исследован в Главе 1). Флуктуации осложняют аккуратное вычисление магнитного давления, вклад в которое должны вносить только тангенциальные к поверхности магнитопаузы компоненты вектора магнитного поля, т.е. используемая оценка магнитного давления может быть завышена. Показано, что существенной зависимости толщины магнитопаузы от давления в магнитослое не наблюдается.

В **разделе 2.6** проводится статистический анализ конфигурации токового слоя магнитопаузы. Показано, что в большинстве случаев, как для миссии ARTEMIS (76.9% отобранных событий), так и для миссии MMS (66.7% отобранных событий), структуру токового слоя ночной магнитопаузы можно описать моделью слоя С-типа. В оставшихся случаях токовый слой имеет конфигурацию S-типа. Данные результаты согласуются с идеей о том, что магнитное пересоединение на магнитопаузе (которое соответствовало бы S-типу токового слоя) чаще наблюдается вблизи Земли, чем на флангах.

Проведен эпох-анализ статистик С- и S-слоев для обеих миссий. Для каждого пересечения измерения магнитного поля и плазменных параметров интерполировались на равномерную сетку  $x \in [-0.5, 0.5]R_E$ , где  $x$  – пространственная координата вдоль нормали к поверхности магнитопаузы,  $x = 0$  соответствует центру токового слоя магнитопаузы.

Профили плотности тока рассчитывались в предположении одномерности рассматриваемых слоев:

$$J_l = -\frac{c}{4\pi} \frac{\partial B_m}{\partial x}, \quad J_m = \frac{c}{4\pi} \frac{\partial B_l}{\partial x} \quad (1)$$

На Рисунке 3 показаны результаты данного эпох-анализа для С-слоев магнитопаузы. Заметной разницы в структуре токовых слоев магнитопаузы на различных радиальных расстояниях не наблюдается. Переходные области плазменных параметров на лунной орбите немного шире (средние значения толщин  $L_n$  и  $L_T$  по данным миссии ARTEMIS в 1.4 раза выше, чем по данным MMS). Эти наблюдения согласуются с распределениями толщин, приведённым в разделе 2.4. Аналогичный вывод был сделан при анализе S-слоев. Таким образом, при удалении от Земли конфигурация фланговой магнитопаузы практически не изменяется. Основные отличия заключаются в амплитуде магнитного поля и плотности электрического тока, и не приводят к принципиальному изменению структуры токового слоя магнитопаузы.

В **разделе 2.7** представлены основные результаты и выводы главы 2.

В **Главе 3** проведен анализ динамики ионов вблизи вращательных разрывов, моделирующих токовый слой ночной магнитопаузы.

В **разделе 3.1** представлено введение к главе: описаны подходы к построению равновесных самосогласованных моделей токовых слоев и проблемы, возникающие при построении кинетических равновесий. Дан краткий об-

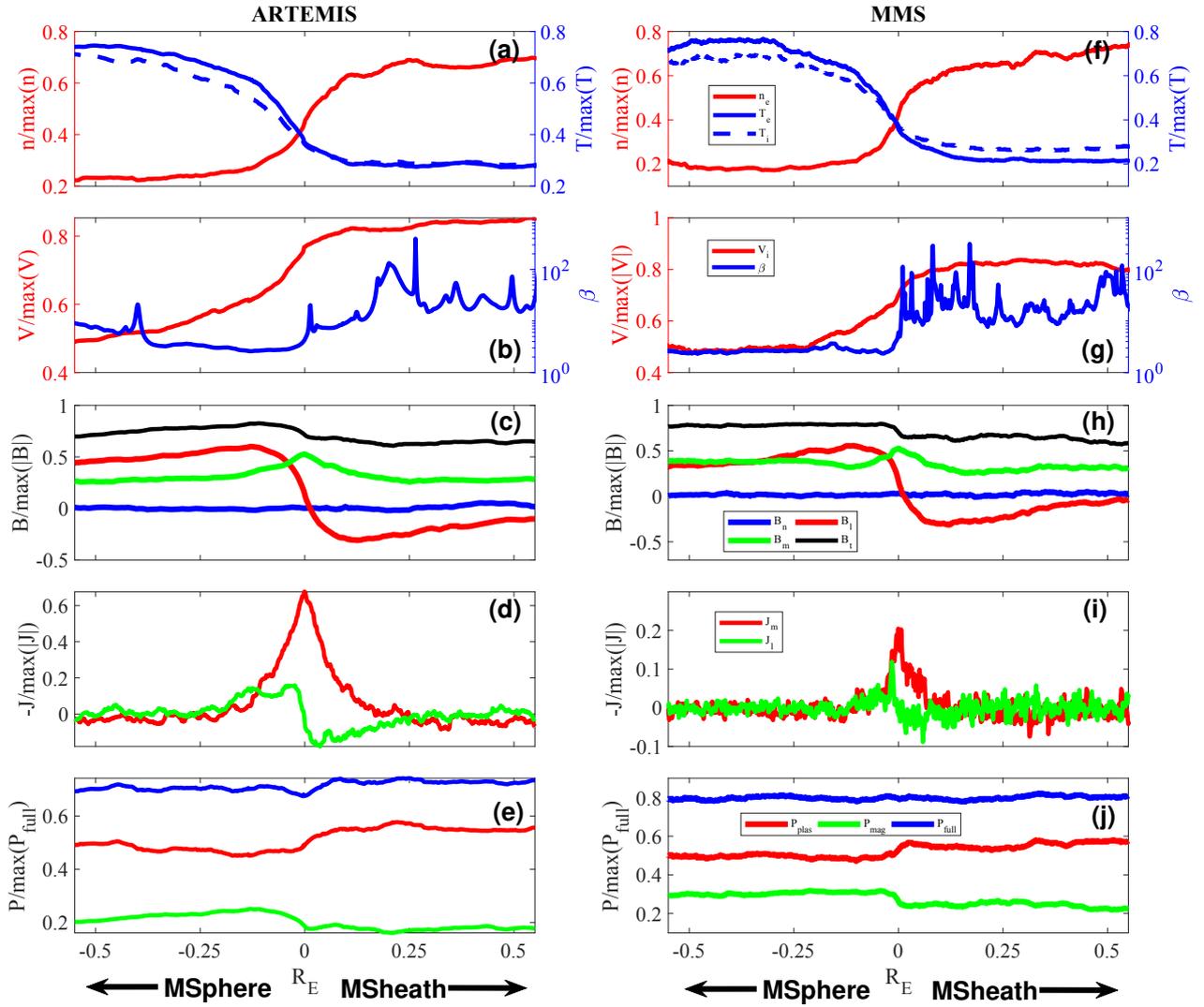


Рис. 3 — Эпох-анализ структуры С-слоев магнитопаузы, (а–е) и (f–j) – данные миссий ARTEMIS и MMS соответственно. (а, f) плотности и температуры плазмы, (b, g) потоковая скорости ионов и плазменное  $\beta$ , (с, h) профили вектора магнитного поля, (d, i) плотность электрического тока, (е, j) плазменное, магнитное и полное давления. Стрелки под графиками указывают направления к магнитосфере (MSphere) и магнитослою (MSheath).

зор имеющихся на текущий момент моделей. Сформулированы цели и задачи главы.

В разделе 3.2 дано краткое описание динамических систем, введено понятие адиабатических инвариантов, приведены условия их существования. Введено понятие сечения Пуанкаре. Указаны условия существования вложенного в фазовое пространство многообразия  $\mathcal{M}$ , дана связь его размерности с размерностью фазового пространства и количеством инвариантов движения.

В разделе 3.3 приведено описание метода главных компонент (МГК) и его нелинейного обобщения. Введены понятия и метод построения главных компонент (ГК) и объясненных долей дисперсии. Приведено описание процесса генерации новых векторов в фазовом пространстве, лежащих в окрестности известного фазового вектора вблизи траектории движения частицы (или вблизи соответствующего сечения Пуанкаре). Описан процесс определения размерности произвольного вложенного многообразия и полного количества интегралов движения (как точных, так и адиабатических).

Раздел 3.4 посвящен описанию алгоритма машинного обучения AI Poinsaré [23], разработанного для определения количества инвариантов движения в динамических системах. Дано подробное описание работы каждого из трех последовательных модулей алгоритма. Введено определение оператора (представляющего собой нейронную сеть), осуществляющего обратную проекцию возмущенных фазовых векторов на вложенное многообразие. Описаны алгоритмы и процесс обучения нейронных сетей. Приведены краткие описания используемых наборов данных. Введен основной гиперпараметр системы – масштаб возмущения фазовых векторов  $l$ , описана его роль в работе алгоритма.

В разделе 3.5 детально описан метод определения размерности вложенного многообразия и количества интегралов движения, применительно к рассматриваемым в рамках главы задачам.

В разделе 3.6 подробно описан процесс получения используемых наборов данных и дано их детальное описание.

Раздел 3.7 посвящен описанию динамики ионов в токовых слоях. Описаны типичные характеристики токовых слоев. Введены понятия скачков адиабатических инвариантов (рассеяния) и параметра  $\kappa$ , контролирующего

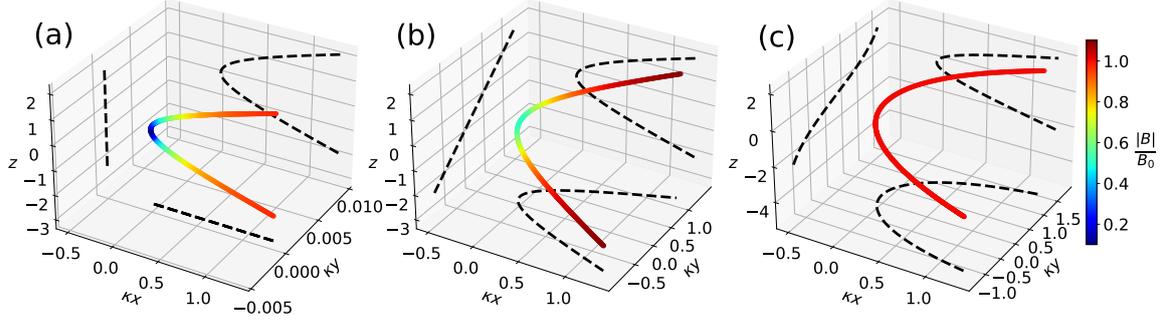


Рис. 4 — Три типичные для магнитопаузы конфигурации токовых слоёв: силовые линии магнитного поля для токовых слоев с (a)  $B_x(z)$ ,  $B_z \neq 0$  и  $B_y = 0$ , (b)  $B_x(z)$ ,  $B_z \neq 0$  и постоянным  $B_y \neq 0$ , (c)  $B_x(z)$ ,  $B_z \neq 0$  и  $B_y(z)$ . Цветом отмечена амплитуда магнитного поля  $B$ .

данный процесс [24]. Введены понятия транзитных и захваченных траекторий.

В **разделе 3.8** дан обзор трех моделей токовых слоев. Приведены Гамильтонианы частиц, движущихся в соответствующих конфигурациях магнитных полей.

Первая и наиболее простая конфигурация описывает сжимаемый плоский токовый слой с  $B_y = 0$ , см. Рис.4(a). Такие токовые слои характерны для хвостов магнитосфер планет [25] и могут наблюдаться на магнитопаузе вблизи областей пересоединения [26]. Гамильтониан, описывающий динамику ионов для данной конфигурации магнитного поля, имеет следующий вид:

$$H = \frac{1}{2m}p_x^2 + \frac{1}{2m}p_z^2 + \frac{1}{2m} \left( p_y + \frac{eB_z x}{c} - \frac{eB_0 z^2}{c 2L} \right)^2$$

Для удобства анализа динамики ионов вводятся следующие безразмерные переменные:  $z \rightarrow z/\sqrt{Lv_0 mc/eB_0}$ ,  $x \rightarrow x/\sqrt{Lv_0 mc/eB_0}$ ,  $p_x \rightarrow p_x/mv_0$ ,  $p_z \rightarrow p_z/mv_0$ , энергия  $\mathcal{H} = H/mv_0^2$  и время  $t \rightarrow tv_0/\sqrt{Lv_0 mc/eB_0}$ .

Постоянный обобщённый импульс  $p_y \rightarrow p_y/mv_0$  может быть положен равным нулю путем сдвига начала координат вдоль оси  $x$ . Соответствующий безразмерный Гамильтониан:

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2}p_z^2 + \frac{1}{2}p_x^2 + \frac{1}{2} \left( \kappa x - \frac{1}{2}z^2 \right)^2 \quad (2)$$

Величина Гамильтониана  $\mathcal{H}$  задается равной  $h = 1/2$  путем соответствующего выбора  $v_0$ . Рассеяние частиц в данной системе широко исследовалось в случаях  $\kappa \ll 1$  и при  $\kappa \geq 1$  [24].

Вторая из рассмотренных конфигураций характерна для токовых слоев, наблюдаемых в солнечном ветре и на магнитопаузе (см. Рис.4(b)). В данной конфигурации присутствует значительная компонента поля  $B_y$ , т.е. такие токовые слои менее сжимаемы. Конфигурация магнитных полей в данном случае определяется векторным потенциалом  $A_x(z)$  и для постоянной компоненты  $B_y$  соответствующий Гамильтониан имеет вид:

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2}p_z^2 + \frac{1}{2}(p_x - sz)^2 + \frac{1}{2}\left(\kappa x - \frac{1}{2}z^2\right)^2 \quad (3)$$

$$s = (B_y/B_0)\sqrt{LeB_0/v_0mc}$$

Третья конфигурация описывает несжимаемые (бессиловые) С-слои (см. Рис.4(c)), которые часто наблюдаются в солнечном ветре и на магнитопаузе. Данная конфигурация описывает вращательные разрывы с сильно искривленными силовыми линиями, где  $B_y = \sqrt{B_0^2 - B_x^2}$ . Для типичных тонких токовых слоев с  $L \approx mv_0c/eB_0$ , соответствующий Гамильтониан имеет вид:

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2}p_z^2 + \frac{1}{2}\left(p_x - z + \frac{1}{3}z^3\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\kappa x - \frac{1}{2}z^2\right)^2 \quad (4)$$

Динамика ионов в данных токовых слоях рассматривалась в работе [27], где было обнаружено быстрое разрушение адиабатических инвариантов, что связано с их геометрическими скачками.

В **разделе 3.9** детально рассмотрена динамика ионов в токовых слоях с  $B_x(z)$ ,  $B_z \neq 0$  и  $B_y = 0$ . Показаны примеры траекторий транзитных и захваченных частиц и соответствующих им сечений Пуанкаре. Введены понятие адиабатических инвариантов  $I_z$  и  $I_x$ , приведена точность их сохранения, и описаны процессы, приводящие к их разрушению. Определены области в пространстве параметров системы, соответствующие одному (полная энергия частиц) и двум (полная энергия частиц и адиабатический инвариант  $I_z$  или  $I_x$ ) интегралам движения. Показано, что транзитные и захваченные частицы разделены в параметрическом пространстве  $(\kappa x_0, \kappa)$ , где  $\kappa x_0$  – начальная

позиция частиц при  $p_x = 0$ . Диапазону  $\kappa x_0 \in (-1, 0.1234)$  соответствует движение частиц по транзитным траекториям, для которых скорость разрушения  $I_z$  зависит от  $\kappa$ :  $T_{AI} \sim \kappa^{-3}$  [24].

В **разделе 3.10** детально рассмотрена динамика ионов в токовых слоях с  $B_x(z)$ ,  $B_z \neq 0$  и постоянным  $B_y \neq 0$ . Введено понятие геометрического скачка адиабатического инварианта. Показан пример траектории транзитных частиц. Определено количество интегралов движения в зависимости от параметров системы, и проведено сравнение результатов с полученными в разделе 3.9. Показано, что для малых  $\kappa < 10^{-2}$  как транзитным, так и захваченным траекториям соответствует два инварианта при  $s = 0.7$ . При  $\kappa \sim 10^{-2}$  транзитным траекториям соответствует всего один инвариант. Как для систем с  $s = 0$ , так и для систем с  $s \neq 0$ , существует параметрическая область около  $\kappa \sim 1$ , где движение частиц является стохастическим, и в системах присутствует единственный интеграл движения (полная энергия). Пороговое значение  $\kappa$ , при котором в системах появляется дополнительный инвариант  $I_x$ , немного меньше для систем с  $s \neq 0$ : конфигурациям с  $s = 0.7$  соответствует два инварианта при  $\kappa > 2$ , в то время как для систем с  $s = 0$  два инварианта наблюдаются при  $\kappa > 2.5$ . Вероятно, в данном случае играет роль эффект уменьшения кривизны магнитных силовых линий и соответствующее уменьшение эффективности рассеяния частиц (и уменьшение скорости разрушения  $I_x$ ) [24] при  $s \neq 0$  ( $B_y \neq 0$ ).

**Разделе 3.11** посвящен исследованию динамики ионов в С-слоях с  $B_x(z)$ ,  $B_z \neq 0$  и  $B_y(z)$ , наиболее типичным для ночной магнитопаузы. На панели (а) Рис. 5 показана типичная транзитная траектория в пространстве  $(z, \kappa x, p_x)$ , соответствующая Гамильтониану (4). Транзитные частицы испытывают сильное рассеяние из-за геометрических скачков адиабатического инварианта [27]. Поскольку магнитные силовые линии не лежат в одной плоскости, данные скачки происходят в довольно малой области пространства  $(\kappa x, p_x)$  [27]. Для захваченных частиц геометрические скачки  $I_z$  не наблюдаются, что объясняет регулярный вид соответствующего сечения Пуанкаре.

Рассмотрены различия в динамике частиц в сжимаемых и бессиловых токовых слоях. Во-первых, область  $\kappa$ , соответствующая одному инварианту для транзитных траекторий ( $\kappa x_0 < 0.2$ ), шире в случае бессиловых слоев:  $\kappa \in [3 \cdot 10^{-4}, 2]$  для бессиловых конфигураций и  $\kappa \in [5 \cdot 10^{-3}, 2]$  для сжи-

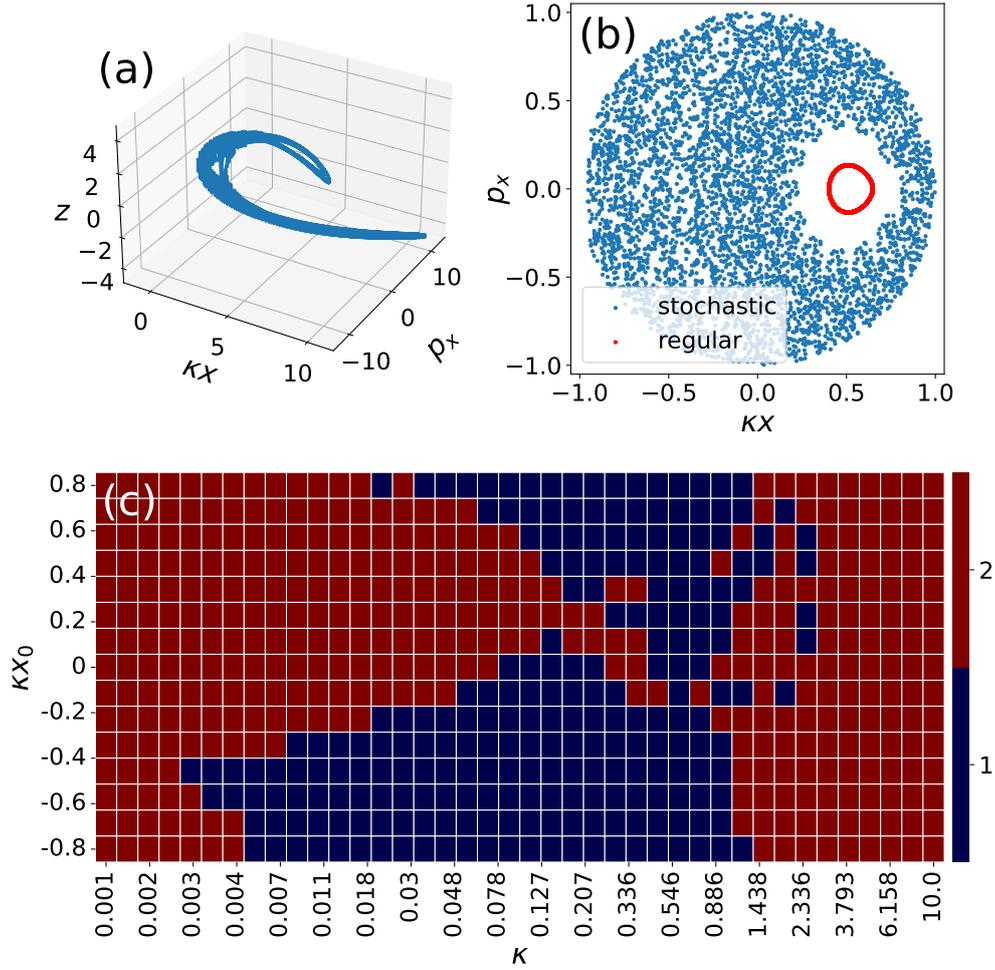


Рис. 5 — (а) Пример траектории частицы в пространстве  $(\kappa x, p_x, z)$  для Гамильтониана (4) при  $\kappa = 0.142$  и  $\kappa x_0 = -0.35$ ; (б) соответствующее сечение Пуанкаре для траектории на панели (а) (синие точки) и захваченной траектории (красные точки); (с) количество инвариантов в пространстве  $(\kappa, \kappa x_0)$ .

маемых. Во-вторых, для бессильных слоев существует область  $\kappa x_0$  между транзиентными и захваченными траекториями, в которой для всех  $\kappa$  существуют два инварианта. Для сжимаемых слоев такая область не наблюдается, и при  $\kappa \sim 1$  движение частиц является стохастическим для всех  $\kappa x_0$ , то есть всем траекториям соответствует единственный интеграл движения (полная энергия). При  $\kappa > 2$  обоим конфигурациям соответствует два инварианта (энергия и магнитный момент).

В разделе 3.12 представлены основные результаты и выводы главы 3, а также приведено их обсуждение в контексте существования стационарных кинетических моделей токовых слоёв магнитопаузы.

Завершающий диссертацию раздел **Заключение** содержит основные результаты и выводы работы.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Two-dimensional self-similar plasma equilibria / A. S. Lukin [et al.] // *Physics of Plasmas*. — 2018. — Jan. — Vol. 25, no. 1. — P. 012906. — DOI: 10.1063/1.5016178.
2. Spatial scales and plasma properties of the distant magnetopause: evidence for selective ion and electron transport / A. S. Lukin [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2019. — July. — Vol. 124, no. 7. — P. 5027–5041. — DOI: 10.1029/2019JA026638.
3. Comparison of the Flank Magnetopause at Near-Earth and Lunar Distances: MMS and ARTEMIS Observations / A. S. Lukin [et al.] // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. — 2020. — Nov. — Vol. 125, no. 11. — e28406. — DOI: 10.1029/2020JA028406.
4. Regimes of ion dynamics in current sheets: The machine learning approach / A. S. Lukin [et al.] // *Phys. Rev. E*. — 2022. — Dec. — Vol. 106, no. 6. — P. 065205. — DOI: 10.1103/PhysRevE.106.065205. — arXiv: 2211.03787 [physics.plasm-ph].

## Список литературы

5. Review of Solar Wind Entry into and Transport Within the Plasma Sheet / S. Wing [et al.] // *Space Sci. Rev.* — 2014. — Nov. — Vol. 184. — P. 33–86. — DOI: 10.1007/s11214-014-0108-9.
6. *Angelopoulos V.* The ARTEMIS Mission // *Space Sci. Rev.* — 2011. — Dec. — Vol. 165. — P. 3–25. — DOI: 10.1007/s11214-010-9687-2.
7. Magnetospheric Multiscale Overview and Science Objectives / J. L. Burch [et al.] // *Space Sci. Rev.* — 2016. — Mar. — Vol. 199. — P. 5–21. — DOI: 10.1007/s11214-015-0164-9.
8. Magnetopause and Boundary Layer / J. De Keyser [et al.] // *Space Sci. Rev.* — 2005. — June. — Vol. 118. — P. 231–320. — DOI: 10.1007/s11214-005-3834-1.

9. *Hasegawa H.* Structure and Dynamics of the Magnetopause and Its Boundary Layers // Monographs on Environment, Earth and Planets. — 2012. — Aug. — Vol. 1. — P. 71–119. — DOI: 10.5047/meep.2012.00102.0071.
10. Mars’s magnetotail: Nature’s current sheet laboratory / A. V. Artemyev [et al.] // Jour. Geophys. Res. — 2017. — May. — Vol. 122. — P. 5404–5417. — DOI: 10.1002/2017JA024078.
11. *Artemyev A. V., Vasko I. Y., Kasahara S.* Thin current sheets in the Jovian magnetotail. // Planetary Space Science. — 2014. — Vol. 96. — P. 133–145. — DOI: 10.1016/j.pss.2014.03.012.
12. Four-point Cluster application of magnetic field analysis tools: The Curlometer / M. W. Dunlop [et al.] // Jour. Geophys. Res. — 2002. — Nov. — Vol. 107. — P. 1384. — DOI: 10.1029/2001JA005088.
13. Orientation and motion of a plasma discontinuity from single-spacecraft measurements: Generic residue analysis of Cluster data / B. U. Å.-. Sonnerup [et al.] // Journal of Geophysical Research (Space Physics). — 2006. — May. — Vol. 111. — A05203. — DOI: 10.1029/2005JA011538.
14. *Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J.* Learning representations by back-propagating errors // nature. — 1986. — Vol. 323, no. 6088. — P. 533–536.
15. *Kingma D. P., Ba J.* Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. — 2014.
16. The Space Physics Environment Data Analysis System (SPEDAS) / V. Angelopoulos [et al.] // Space Sci. Rev. — 2019. — Jan. — Vol. 215. — P. 9. — DOI: 10.1007/s11214-018-0576-4.
17. Thin current sheets in collisionless plasma: Equilibrium structure, plasma instabilities, and particle acceleration / L. M. Zelenyi [et al.] // Plasma Physics Reports. — 2011. — Feb. — Vol. 37. — P. 118–160. — DOI: 10.1134/S1063780X1102005X.
18. *Phan T. D., Paschmann G.* Low-latitude dayside magnetopause and boundary layer for high magnetic shear 1. Structure and motion // Jour.

- Geophys. Res. — 1996. — Apr. — Vol. 101. — P. 7801–7816. — DOI: 10.1029/95JA03752.
19. High-latitude Earth’s magnetopause outside the cusp: Cluster observations / E. V. Panov [et al.] // Jour. Geophys. Res. — 2008. — Jan. — Vol. 113. — P. 1220. — DOI: 10.1029/2006JA012123.
  20. *Baumjohann W., Paschmann G., Cattell C. A.* Average plasma properties in the central plasma sheet // Jour. Geophys. Res. — 1989. — June. — Vol. 94. — P. 6597–6606. — DOI: 10.1029/JA094iA06p06597.
  21. Spatial distributions of the ion to electron temperature ratio in the magnetosheath and plasma sheet / C. Wang [et al.] // Jour. Geophys. Res. — 2012. — Vol. 117. — A08215. — DOI: 10.1029/2012JA017658.
  22. Origin of low proton-to-electron temperature ratio in the Earth’s plasma sheet / E. E. Grigorenko [et al.] // Jour. Geophys. Res. — 2016. — Vol. 121, no. 10. — P. 9985–10, 004. — DOI: 10.1002/2016JA022874. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/2016JA022874>.
  23. *Liu Z., Tegmark M.* Machine learning conservation laws from trajectories // Physical Review Letters. — 2021. — Vol. 126, no. 18. — P. 180604.
  24. *Büchner J., Zelenyi L. M.* Regular and chaotic charged particle motion in magnetotail-like field reversals. I - Basic theory of trapped motion // J. Geophys. Res. — 1989. — Sept. — Vol. 94. — P. 11821–11842. — DOI: 10.1029/JA094iA09p11821.
  25. Current sheets in the Earth magnetotail: plasma and magnetic field structure with Cluster project observations / A. A. Petrukovich [et al.] // Space Sci. Rev. — 2015. — Vol. 188. — P. 311–337. — DOI: 10.1007/s11214-014-0126-7.
  26. Evidence for quasi-stationary reconnection at the dayside magnetopause / J. T. Gosling [et al.] // Jour. Geophys. Res. — 1982. — Apr. — Vol. 87, A4. — P. 2147–2158. — DOI: 10.1029/JA087iA04p02147.
  27. Superfast ion scattering by solar wind discontinuities / A. V. Artemyev [et al.] // Phys. Rev. E. — 2020. — Sept. — Vol. 102, no. 3. — P. 033201. — DOI: 10.1103/PhysRevE.102.033201.