МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Лаврухин Александр Сергеевич

Магнитосферы небесных тел в разных условиях обтекания потоком замагниченной плазмы

Специальность 1.3.1. «Физика космоса, астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Алексеев Игорь Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Демехов Андрей Геннадьевич,**
доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, лаборатория магнитосферно-ионосферных взаимодействий, Полярный геофизический институт (ПГИ РАН), заведующий сектором, отдел астрофизики и физики космической плазмы, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН)

Пилипенко Вячеслав Анатольевич,
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией физики околоземного пространства, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Шематович Валерий Иванович,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом исследований Солнечной системы, Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)

Защита состоится 19 сентября 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: dissovet@sai.msu.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте диссертационного совета: https://dissovet.msu.ru/dissertation/3070.

Автореферат разослан 19 августа 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности

Магнитосферы планет и спутников являются очень сложными, структурированными и зависящими от времени системами, постоянно взаимодействующими с солнечным ветром и составляющими планетарной среды: ионосферой, атмосферой, поверхностью и спутниками/планетой. Магнитосфера каждого небесного тела имеет свои собственные уникальные особенности, однако основные токовые системы и плазменные процессы описываются одинаково. Магнитосферы являются доступными естественными лабораториями для изучения фундаментальных процессов, имеющих универсальное применение. Более того, в случае Земли, магнитосфера является ключевым элементом околоземной среды, от состояния которой все больше зависит современное общество.

Невидимые человеческому глазу, магнитосферы можно изучать только при помощи различных инструментов, теоретических и численных моделей. За более чем 60 лет космической эры было накоплено большое количество данных, как наземных, так и измеренных непосредственно в космическом пространстве, которые характеризуют состояние магнитосфер планет. Имеющиеся наиболее популярные модели магнитосфер планет в основном являются либо численными (магнитогидродинамические (МГД) модели, гибридные модели), либо аналитическими, усредняющими большой массив данных КА для каждой фиксированной точки магнитосферы. Между тем, создание модульной модели магнитосферы, учитывающей вклады отдельных токовых систем, является более универсальным решением, на физическом уровне описывающем происходящие в магнитосфере процессы и позволяющее точно знать вклад каждой токовой системы в магнитное поле в данной точке. Развитие подхода рассмотрения модели каждой токовой системы в отдельности позволит в будущем создать универсальную модель, учитывающую глобальные процессы на всех уровнях.

Конечно, магнитосферы планет сохраняют свою специфику, определяемую как физическими размерами, так и конкретными деталями строения планетарной системы. Например, в магнитосфере Меркурия, где больше половины объема передней части магнитосферы занято самой планетой, уже не остается места для кольцевого тока и радиационных поясов. У него также нет спутников. А у Юпитера напротив есть мощные радиационные пояса и большое число спутников (63). Некоторые из них существенно меняют структуру магнитосферы. Так, например, самое активное по числу вулканических выбросов тело Солнечной системы — спутник Юпитера Ио, выбрасывает во время извержения вулканов так много вещества в магнитосферу, что после ионизации и раскручивания плазмы в магнитном поле Юпитера эти выбросы формируют экваториальный магнитодиск, который увеличивает эффективный магнитный момент

планеты почти в три раза и дает определяющий вклад в баланс давления у магнитопаузы.

Исследования в обозначенных направлениях активно продолжаются, в том числе запускаются космические миссии и возрастает количество поступающих данных о структуре магнитосфер планет, способных пролить свет на происходящие процессы, что говорит о незавершенности исследований и подчеркивает актуальность поставленной задачи.

Целью данной работы является исследование состояния магнитосфер небесных тел в разных условиях обтекания потоком замагниченной плазмы (до- и сверх-альвеновском режимах) на примере магнитосфер планет Солнечной системы — Меркурия и Земли, а также спутника Юпитера Ганимеда с использованием данных измерений межпланетных космических миссий.

Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать программные средства, позволяющие производить фиксацию пересечений КА головной ударной волны и магнитопаузы по данным магнитометра космического аппарата.
2. Исследовать форму и изменение расстояния до подсолнечной точки головной ударной волны и магнитопаузы магнитосферы Меркурия по данным КА MESSENGER.
3. Исследовать возможность существования радиационных поясов Меркурия.
4. Исследовать влияние величины кольцевого тока на движение формирующих его заряженных частиц в магнитном поле Земли при помощи теории Штермера.
5. Провести анализ данных магнитометров космических аппаратов THEMIS A, E и GOES 16, 18, полученные во время магнитной бури 26-28 февраля 2023 года.
6. Выявить механизмы, которые привели к наблюдению полярных сияний на широтах Москвы во время бури 26-28 февраля 2023 года при помощи параболоидной модели магнитосферы Земли.
7. Исследовать механизмы ускорения заряженных частиц, приводящих к появлению полярных сияний на спутнике Юпитера Ганимеде.

Объект и предмет исследования:

Объектами исследования являются физические условия в окрестностях планет Меркурия, Земли и спутника Юпитера Ганимеда на основе

экспериментальных данных, полученных при работе межпланетных космических миссий. Предмет исследования — форма и интенсивность токовых слоев, формирующих магнитосферу.

Научная новизна

1. Впервые оценена степенная зависимость годовых изменений расстояния до подсолнечной точки головной ударной волны магнитосферы Меркурия в зависимости от гелиоцентрического расстояния. Сформирован временной ряд размеров магнитосферы и головной ударной волны для всех 4000 оборотов КА MESSENGER вокруг Меркурия. Это позволяет иметь реперные точки для всех параметров магнитосферных токовых систем, формирующих магнитосферу, со скважностью 8-10 часов для 2011-2015 годов.
2. Впервые сделана оценка скачка магнитного поля при переходе из области межпланетного пространства в область переходного слоя для магнитосферы Меркурия. Определены годовые вариации этого одного из центральных параметров головной ударной волны перед магнитосферой.
3. Впервые показана принципиальная возможность существования вблизи Меркурия области захвата протонов с энергиями до 100 кэВ. Новизна использованного подхода состоит также в том, что мы производим рассмотрение движения захваченных частиц как с помощью анализа разрешенных областей движения по Штермеру, отталкиваясь от сохранения обобщенного момента импульса, так и используя анализ тестовых траекторий в модельном поле.
4. Впервые показано, что существует критическая величина кольцевого тока, при достижении которой дальнейший захват частиц геомагнитным полем Земли становится невозможным. Сделаны оценки величины данного тока.
5. Определены параметры глобальных магнитосферных токовых систем и их вклады в наблюдавшееся уменьшение магнитного поля на экваторе Земли для магнитной бури 27 февраля 2023 года, во время которой полярные сияния наблюдались на широтах Москвы.
6. Предложен новый механизм возникновения ускоряющего продольного потенциала в магнитосфере Ганимеда, приводящая к ускорению электронов и генерации полярных сияний. Впервые численно оценена эффективность этого механизма.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость состоит в разработке новых методов и подходов к определению и моделированию магнитосферного магнитного поля, в том числе и самосогласованного, т.е. созданного самой плазмой. Исследовано влияние этого поля на движение заряженных частиц

и на динамику магнитосферы в целом как для кометообразной сверхальвеновской магнитосферы, так и для до-альвеновской магнитосферы с альвеновскими крыльями, уходящими на значительные расстояния к центральному телу. Полученные результаты могут использоваться как для изучения глобальной пространственной структуры токовых систем, так и для описания внутренних магнитных полей небесных тел, при котором важен вопрос определения и разделения полей как внутрипланетных, так и внешних (магнитосферных) источников. Разработанные подходы могут быть в дальнейшем использованы для уточнения параметров внутренних полей планет. Практическая значимость обусловлена возможностью применения разработанных методик для анализа данных с космических аппаратов.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на анализе экспериментальных данных, полученных от межпланетных космических миссий, и создании и применении физических моделей, описывающих процессы, происходящие в окрестностях рассматриваемых небесных тел. Исследование было проведено с использованием специально созданных для этой цели методов обработки больших массивов — измерений вектора магнитного поля вдоль траектории КА на орбите спутника Меркурия или Земли с учетом конкретной задачи, а также на основе существующих результатов плазменных измерений КА в пространстве возле Меркурия, Земли и Ганимеда.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Расстояние от центра Меркурия до подсолнечной точки головной ударной волны перед магнитосферой Меркурия практически не зависит от гелиоцентрического расстояния до планеты.
2. Среднее магнитное поле при пересечении головной ударной волны (при переходе из области межпланетного пространства в область переходного слоя) возрастает примерно в 1.5 раза в перигелии орбиты Меркурия и — в 2.1 раза в афелии.
3. Заряженные частицы в магнитосфере Меркурия могут быть захвачены по крайней мере на несколько дрейфовых периодов (как протоны, так и ионы натрия Na^+).
4. Существует критическая величина кольцевого тока в магнитосфере Земли, при достижении которой дальнейший захват частиц геомагнитным полем Земли становится невозможным.
5. Во время магнитной бури 27 февраля 2023 года наибольший вклад в максимальное наблюдавшееся значение SYM-H индекса дало магнитное поле токового слоя хвоста магнитосферы.
6. Ускорение электронов, приводящих к появлению авроральных свечений на Ганимеде, происходит на скачке продольного потенциала электрического поля, возникающего из-за недостатка тепловых

электронов, необходимых для поддержания соответствующего тока в цепи Альвеновских крыльев.

Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом проанализированного материала, использованием методов статистики и моделирования, соответствующих поставленным целям и задачам. Результаты были получены с использованием надежных публично доступных данных измерений. Выносимые на защиту положения работы опубликованы в рецензируемых журналах, относящихся к спискам WoS, Scopus и RSCI, обсуждены на семинарах и конференциях.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на:

1. Конференция Magnetospheres of Outer Planets 2015 (Атланта, США).
2. Семинар Физика авроральных сияний 2015 (Апатиты)
3. Конференция Europlanet Planetary Science Congress 2019 (Женева, Швейцария)
4. Конференция Europlanet Planetary Science Congress 2020, 2021 (онлайн)
5. Конференция European Geophysical Union Meeting 2021 (онлайн)
6. Конференция Ломоносовские чтения 2021, 2022 (Москва)
7. Конференция Физика плазмы в Солнечной системе 2020, 2022, 2023 (Москва)
8. Конференция Проблемы космофизики 2023 (Дубна)

Личный вклад

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором самостоятельно при консультациях с научным руководителем. Роль автора в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющей. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в работе, подтверждено соавторами и отражено в совместных публикациях [A1-A7].

В статье A1 (полярные сияния на Ганимеде) автор принимал участие в написании всех разделов, а также провел все расчеты, личный вклад 85%. В статье A2 (влияние силы кольцевого тока на области движения частиц энергий кольцевого тока в магнитосфере Земли) автором были написаны все разделы; автор принимал участие в подготовке программы для расчетов, а также провел все необходимые расчеты, личный вклад 80%. В статье A3 (захваченная радиация в магнитосфере Меркурия) автор принимал участие в подготовке программы для расчетов, а также в написании введения и обобщении результатов, вклад 30%. В статье A4 (автоматическое определение пересечений головной ударной волны и магнитопаузы Меркурия) автор принимал участие в разработке метода автоматического определения пересечений головной ударной волны и магнитопаузы по данным магнитометра космического аппарата, визуализации результатов, а

также им были написаны введение и описание изучаемых физических объектов, вклад 40%. В статье А5 (годовые вариации головной ударной волны и магнитопаузы Меркурия) автор принял участие в написании всех разделов, а также принимал участие в визуализации результатов, вклад 40%. В статье А6 (глобальное моделирование магнитосферы Земли во время магнитной бури) автор подготовил программы для анализа и визуализации данных магнитометров космических аппаратов MESSENGER, THEMIS, GOES, а также визуального представления их траекторий, принимал участие в написании всех разделов, а также проведении расчетов по модели, вклад 50%. В тезисе доклада А7 (определение пересечений головной ударной волны и магнитопаузы Меркурия при помощи нейронных сетей), автор принимал участие в формулировке целей и написании введения, а также в предварительной подготовке данных для обучения нейронных сетей, вклад 20%.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты изложены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, и одном тексте доклада.

Список публикаций в Web of Science/Scopus:

А1. **Лаврухин А. С.**, Алексеев И. И. Авроральное свечение в высоких широтах Ганимеда // Письма в Астрономический журнал. — 2015. — Т.41, № 11. — С. 744–750. — Импакт-фактор РИНЦ 2018: 0.839. — Объем 0.81 печ. л. // Переводная версия: **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I. Aurora at High Latitudes of Ganymede // Astronomy Letters. — 2015. — V.41, № 11. — P. 744–750. — Web of Science JIF 2023: 1.1. — Объем 0.69 печ. л. Личный вклад 85%.

А2. **Lavrukhin A. S.**, Alexeev, I. I., Tyutin, I. V. Influence of the Earth's ring current strength on Størmer's allowed and forbidden regions of charged particle motion // Annales Geophysicae. — 2022. — V.37. — P. 535–547. — Web of Science JIF 2023: 1.7. — Объем 1.50 печ. л. Личный вклад 80%.

А3. Лукашенко, А. Т., **Лаврухин, А. С.**, Алексеев, И. И., Беленькая, Е. С. Возможность существования захваченной радиации у Меркурия // Письма в Астрономический Журнал. — 2020. — Т.46, № 11. — С. 814–826. — Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0.839. — Объем 1.50 печ. л. // Переводная версия: Lukashenko, A. T., **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I., Belenkaya, E. S. Possibility of the Existence of Trapped Radiation near Mercury // Astronomy Letters. — 2020. — V.46, № 11. — P. 814–826. — Web of Science JIF 2023: 1.1. — Объем 1.39 печ. л. Личный вклад 30%.

А4. Невский, Д. В., **Лаврухин, А. С.**, Алексеев, И. И. Автоматическое определение положения головной ударной волны и

магнитопаузы магнитосферы меркурия по данным магнитометра космического аппарата MESSENGER // Космические Исследования. — 2023. — Т.61, № 3. — С. 189–201. — Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0.820. — Объем 1.50 печ. л. // Переводная версия: Nevskii, D. V., **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I. Automatic Detection of Bow Shock and Magnetopause Positions at Mercury's Magnetosphere Using MESSENGER Magnetometer Data // Cosmic Research. — 2023. — V.61, № 3. — P. 189—201. — Web of Science 2023 JIF: 0.6. — Объем 1.39 печ. л. Личный вклад 40%.

A5. Nevsky, D., **Lavrukhin, A.**, Alexeev, I. Mercury's Bow Shock and Magnetopause Variations According to MESSENGER Data // Universe. — 2024. — V.10 № 40. — Web of Science 2023 JIF: 2.5. — Объем 1.39 печ. л. Личный вклад 40%.

A6. **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I., Belenkaya, E. S., Kalegaev, V. V., Nazarkov, I. S., Nevsky, D. V. Magnetosphere and auroral oval dynamics during February 27, 2023 magnetic storm // Cosmic Research. — 2024. — V.62 № 2. — Web of Science 2023 JIF: 0.6. — Объем 1.85 печ. л. Личный вклад 50%.

Иные публикации:

A7. Julka, S., Kirschstein, N., Granitzer, M., **Lavrukhin, A.**, Amerstorfer, U., Deep Active Learning for Detection of Mercury's Bow Shock and Magnetopause Crossings // Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, ed. Amini, M.-R., Canu, S., Fischer, A., Guns, T., Kralj Novak, P., Tsoumakas, G. — 2023. — P. 452–467. Объем 1.85 печ. л. Личный вклад 20%.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 142 страницы, 39 рисунков и 8 таблиц, общее число наименований литературы во всех главах, включая публикации автора — 125.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, описываются поставленная цель и задачи, требующие решения для реализации поставленных целей, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Описываемый подход моделирования магнитосферных процессов и магнитосфер в целом основан на рассмотрении небольшого набора квазистационарных глобальных токовых систем для моделирования магнитного поля магнитосферы без учета переходных процессов и волновых явлений.

В последующих главах описываются подходы к моделированию отдельных токовых систем магнитосфер небесных тел и полученные результаты, затем формулируются выводы. Для описания были выбраны магнитосферы Меркурия, как наиболее простая, в которой отсутствуют некоторые крупномасштабные токовые системы, характерные для других планет, однако остаются базовые; магнитосфера Земли, как наиболее изученная и актуальная для практических приложений и магнитосфера спутника Юпитера Ганимеда, как уникальная до-альвеновская магнитосфера спутника, магнитно связанного с планетой-гигантом. На орбитах планет солнечной системы поток солнечного ветра сверхзвуковой и сверхальввеновский, поэтому перед планетарными магнитосферами образуется головная ударная волна, за которой расположен переходный слой, ограниченный на внутренней стороне магнитопаузой. На магнитопаузе сосредоточены токи экранировки, с ночной стороны формируется хвост магнитосферы и соответствующая токовая система. В случае до-альвеновской магнитосферы головная ударная волна отсутствует и силовые линии планетарного магнитного поля замыкаются напрямую на внешнее по отношению к небесному телу магнитное поле; единая структура хвоста не формируется, а возникают два так называемых альвеновских крыла, вдоль которых от обоих полушарий на значительные расстояния от области взаимодействия распространяются продольные токи и соответствующие возмущения.

Для глобального моделирования магнитосфер используются несколько различных подходов. Наиболее распространены численные реализации различных магнитогидродинамических и гибридных моделей. Однако они включают в себя множество артефактов, которые практически невозможно отделить от реальных физических явлений. Другой подход к моделированию основан на аналитическом описании магнитосферных токовых систем. Наиболее проработаны эмпирические модели, развиваемые Цыганенко с соавторами — для Меркурия [1; 2] и для Земли [3—5], которые минимизируют невязку между некой «средней» моделью и собранными в единый массив усредненными магнитными измерениями вдоль траектории различных КА. При этом усредняются сильно различающиеся вектора поля, полученные в одной области пространства при различных состояниях магнитосферы. Однако, такой подход затрудняет выделение, ключевых глобальных токовых систем и их масштабирование для препятствия различного размера. Усредненые модели требует специальной «ручной» подгонки при их использовании для наиболее важных с точки зрения практических приложений и сильно возмущенных условий, когда поступление энергии от солнечного ветра может возрастать в сотни раз. Эмпирический подход практически бесполезен для небесных тел, где прямых измерений магнитного поля на КА мало или они совсем отсутствуют. При этом становятся весьма продуктивны модели, основанные на модульном принципе: рассчитывается вклад отдельных источников магнитного

поля, отмасштабированных для конкретного тела, и затем эти вклады суммируются. Модульность позволяет легко добавлять и убирать источники поля в зависимости от изучаемого небесного тела, а также изменять параметры источников в широком диапазоне.

Первая глава посвящена исследованию формы и положения головной ударной волны и магнитопаузы магнитосферы Меркурия. Изложенные в первой главе результаты опубликованы в работах автора [A4; A6; A7]. За счет большого эксцентриситета орбиты планеты динамическое давление Солнечного ветра изменяется в ~ 2.31 раз при сравнении значений в перигелии и афелии, что приводит к годовым изменениям глобальных параметров магнитосферы, в частности расстояний до подсолнечных точек поверхностей головной ударной волны и магнитопаузы. Для изучения средней формы этих поверхностей и изменения их положений во времени были использованы данные КА MESSENGER, который за 4 года (2011-2015) совершил более 4000 витков вокруг планеты и практически на каждом витке пересекал как магнитопаузу, так и головной ударной волну.

В работе автора [A4] был описан разработанный им метод автоматического определения пересечений головной ударной волны и магнитопаузы Меркурия, основанный на статистических методах обработки данных временных рядов магнитометра. Сравнение результатов работы разработанного алгоритма с результатами, полученными при «ручной» обработке всего массива данных КА MESSENGER в работе [6] показало, что автоматически определенные пересечения в 83% случаев для магнитопаузы и в 87% случаев для головной ударной волны находятся в пределах одной минуты от значений, полученных «вручную», что для пространственных масштабов соответствует около 100 км (сравнимо с ларморовским радиусом протонов солнечного ветра). Предобработанный набор данных магнитометра КА MESSENGER также использовался в работе автора [A7] для поиска пересечений головной ударной волны и магнитопаузы при помощи нейронных сетей.

Массив координат пересечений головной ударной волны и магнитопаузы можно использовать для определения их основных параметров для каждого витка и изучения годовых вариаций. Для изучения возможных эффектов вариаций магнитосферы наиболее продуктивным является рассмотрение глобальных пространственных параметров — расстояний от центра планеты до подсолнечной точки магнитопаузы R_{ss} и до головной ударной волны R_{bs}. Точка пересечения поверхности космическим аппаратом проектируется в подсолнечную точку для данной «мгновенной» поверхности и становится возможным изучение вариаций глобальных параметров магнитосферы. Массив точек пересечения головной ударной волны хорошо описывается как параболоидом, так и гиперболоидом вращения. Сглаженную форму поверхности магнитопаузы Меркурия можно описать

как аксиально симметричными формами (форма Шу [7] и коническими сечениями, в частности параболоидом вращения), так и трехмерной асимметричной поверхностью, содержащей углубления в областях каспов и различной толщиной хвоста магнитосферы в направлениях север-юг и запад-восток [8]. Для определения вариаций магнитопаузы была выбрана поверхность параболоида вращения, несмотря на тот факт, что поверхность Шу [7] лучше описывает среднюю форму магнитопаузы. Это было сделано из-за возможности унификации (возможности применять одинаковый тип зависимости для описания различных поверхностей) и дальнейшего использования полученных результатов, например для моделирования магнитного поля переходного слоя в параболических координатах [9], в предположении, что поверхности магнитопаузы и головной ударной волны представляют собой параболоиды вращения; а также для глобального моделирования магнитосферы Меркурия [10; 11]. Кроме того, вариации магнитопаузы уже были рассчитаны при помощи формы магнитопаузы Шу и метода «мгновенной» поверхности в работе [6].

При фитировании полученных расстояний до подсолнечных точек магнитопаузы в зависимости от гелиоцентрического расстояния до Меркурия был получен показатель степени 0.29, что близко к теоретически предсказываемой величине 1/3, но несколько отлично от нее. Отличие возможно возникает из-за наведенной индукции в проводящем ядре Меркурия [12]. Для зависимости расстояния до головной ударной волны впервые был определен показатель степени, который был близок к нулю — 0.09, т.е. изменения R_{bs} с гелиоцентрическим расстоянием происходят очень медленно по сравнению с расстояниями до подсолнечной точки магнитопаузы. Значение ΔR_{ss}, полученное при помощи параболоидной формы магнитопаузы, очень близко к ΔR_{ss}, полученному при помощи модели Шу в работе [6], что говорит о том, что хотя поверхность Шу лучше описывает облако точек пересечения магнитопаузы, оба подхода справедливы и могут быть использованы для дальнейшего изучения динамики как магнитопаузы, так и переходного слоя магнитосферы.

Также было проанализировано изменение средней величины ММП на орбите Меркурия (усредненной за временные интервалы от апогермия витка КА до пересечения головной ударной волны и обратно) и средней величины магнитного поля в переходном слое (усредненной за временные интервалы от пересечения головной ударной волны до пересечения магнитопаузы на входе в магнитосферу и обратно на выходе) для каждого витка КА. Средняя величина магнитного поля в дневном переходном слое в перигелии равна 70.38 нТл, а межпланетное магнитное поле (ММП) — 46.98 нТл, что дает отношение $\langle B_{msh}\rangle/\langle B_{IMF}\rangle = 1.50$ — степень сжатия ММП. Такие же величины в афелии составляют 35.63 нТл и 16.99 нТл, давая таким образом $\langle B_{msh}\rangle/\langle B_{IMF}\rangle = 2.10$. Можно видеть, что отношение

$\langle B_{msh}\rangle/\langle B_{IMF}\rangle$ увеличивается с увеличением гелиоцентрического расстояния в 1.4 раза.

Вторая глава посвящена исследованию возможности существования радиационных поясов в магнитосфере Меркурия. Изложенные во второй главе результаты опубликованы в работе автора [А3]. Существование захваченной радиации у Меркурия обсуждалось с момента открытия у него собственного магнитного поля. Однако, поскольку размеры магнитосферы Меркурия относительно радиуса планеты в $\sim$ 7-8 раз меньше, чем у Земли, пробочное отношение магнитного поля в возможной области захвата к магнитному полю у поверхности оказывается у Меркурия существенно меньше, чем в случае Земли. В миниатюрной магнитосфере Меркурия планета занимает почти весь ее объем, не оставляя места для радиационных поясов. Устойчивых радиационных поясов в магнитосфере Меркурия не было зафиксировано, однако существует обширная экзосфера, состоящая из частиц, выбитых из поверхности планеты в результате различных процессов, и имеются спорадические наблюдения повышенных потоков энергичных частиц в различных регионах магнитосферы. Кроме того, по результатам последних исследований данных КА MESSENGER обнаруживаются вероятные признаки частичного кольцевого тока [13], а также электронных радиационных поясов [14].

В работах [15—17] при помощи моделирования движения заряженных частиц было показано, что электроны при определенных условиях могут оставаться квазизахваченными, не высыпаясь на поверхность планеты и не уходя за пределы магнитосферы. Вместе с тем моделирование в работе [17] показало, что для выбранного диапазона энергий из-за больших гирорадиусов энергичные ионы H^+ (24 кэВ) и Na^+ (5 кэВ) будут сталкиваться с планетой или магнитопаузой, не успев совершить полный оборот по дрейфовой орбите. В итоге принципиальный вопрос существования радиационных поясов у Меркурия остается открытым.

Для исследования вопроса о самом существовании магнитной ловушки в планетарном магнитном поле подходит формализм Штермера [18]. Его суть заключается в том, что в приближении аксиальной симметрии и постоянства энергии заряженных частиц можно определить геометрию разрешенных и запрещенных зон движения заряженных частиц, что очень удобно для глобального топологического анализа движения множества частиц одновременно. В качестве аксиально симметричной конфигурации магнитного поля была выбрана сумма планетарного дипольного поля и коллинеарного с ним однородного внешнего поля, описывающего в первом приближении поле магнитосферных токовых систем. Аксиальная симметрия является в данном случае первым приближением, использование которого существенно снижает численную трудоемкость задачи. Кроме того, предполагается, что если стабильный захват не возникает в симметричном поле, то и в несимметричном он наблюдаться не будет. Для оценок

внешнего однородного поля использовалась величина поля токов на магнитопаузе, которые дают основной вклад в случае Меркурия; вклад токов хвоста и кольцевого тока (который, если и есть, то очень слабый) считался малым. В связи с тем, что на дневной стороне область возможного захвата частиц ограничена магнитопаузой, находящейся в среднем на расстоянии ~ 1.4 R_M, это расстояние было принято в качестве расстояния от центра диполя до границы, где может располагаться область захвата частиц.

Возможность длительного удержания частиц существенно зависит от их энергий. Для рассматриваемого аксиально симметричного случая при внешнем однородном поле 50 нТл предельной является кинетическая энергия протонов около 340 кэВ. Поэтому, при дальнейшем анализе рассматривалось близкое по порядку величины к предельному значение энергии 100 кэВ. Для подтверждения возможности захвата частиц таких энергий был проведен расчет траекторий частиц при помощи метода, описанного в работе [19]. В итоге были рассмотрены наборы из траекторий 30'000 протонов, стартовая точка которых располагалась на различных расстояниях от оси диполя в магнитной экваториальной плоскости, а направления скорости выбирались случайно с изотропным распределением в пространстве.

Как следует из проведенного моделирования, в случае Меркурия удержание частиц возможно лишь в довольно узкой приэкваториальной области. Заряженные частицы могут быть захвачены по крайней мере на несколько дрейфовых периодов (как протоны, так и ионы натрия Na^+ с теми же значениями параметров Штермера), что подтверждает полученные ранее результаты для электронов. В итоге принципиального запрета на существование вблизи Меркурия области захвата протонов с энергиями 100 кэВ и меньше обнаружено не было. Из проведенного рассмотрения следует, что при увеличении размера магнитосферы (например, в периоды низкого давления солнечного ветра) могут создаваться условия для возникновения радиационных поясов у Меркурия.

Третья глава посвящена исследованию возможного ограничения на максимальную величину кольцевого тока в магнитосфере Земли, при котором разрушается сама область захвата. Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в работе автора [A2]. Сильные возмущения магнитосферы Земли в виде магнитных бурь напрямую связаны с кольцевым током. Увеличение его силы приводит к сжатию внутреннего магнитного поля планеты. В спокойное время кольцевой ток локализован вблизи геомагнитного экватора, направлен на запад и мало зависит от местного времени. Величина кольцевого тока во время магнитной бури может достигать 10 МА [20]. Профили радиального потока и давления частиц кольцевого тока в спокойные периоды имеют максимум при $L_{max} = 5.5 - 6.0$, а во время магнитных бурь при $L_{max} = 2 - 5$ [21]. В спокойное время ток в основном состоит из протонов [22]. Ионная компонента O^+ становится

преобладающей только во время очень сильных бурь [22]. Буревой кольцевой ток существенно отличается от радиационных поясов, состоящих из более энергичных частиц, по составу, динамике и механизмам генерации. Энергия ионов кольцевого тока находится в интервале 1 – 200 кэВ [23].

Для проведения исследования был расширен изначальный подход Карла Штермера [18]. Для выполнения условия аксиальной симметрии задачи был рассмотрен вклад дипольного поля Земли, b_z компоненты внешнего поля (в данном случае ММП или токового слоя хвоста) и аксиально симметричного кольцевого тока, имеющего вид бесконечно тонкого токового кольца в магнитной экваториальной плоскости. Предполагалось, что не все частицы кольцевого тока сосредоточены в нитевидном кольце, но при этом магнитное поле, создаваемое реальным кольцевым током, такое же, как и создаваемое нитевидным кольцом с током. Также, не учитывалось наличие магнитопаузы, расположенной на расстоянии в несколько радиусов Земли на дневной магнитосфере. Несмотря на простоту рассматриваемой задачи, этот подход может быть использован для понимания процессов, происходящих при изменении силы кольцевого тока, и для оценки максимального числа частиц, которые могут быть захвачены дипольным полем. Моделирование проводилось для протонов, имеющих энергии 10 и 100 кэВ. Результаты моделирования показали, что с увеличением силы кольцевого тока две изначально разделенные (при $I = 0$ А) разрешенные области движения частиц (внутренняя область захвата и внешняя пролетная область) становятся связанными. При этом для частиц с энергией 100 кэВ выход из внутренней области захвата возникает раньше, чем для частиц с энергией 10 кэВ, при силе тока 9.17 МА. Когда ток достигает 10.28 МА, частицы с энергией 10 кэВ также получают возможность покинуть область захвата. В результате частицы внешнего края кольцевого тока с разной энергией могут покинуть область захвата. Полученные величины тока согласуются с наблюдениями, а полученные значения D_{st} индекса для этих величин силы тока составляют 226 и 253 нТл, которые не уникальны и обычно характеризуют сильные бури. Однако надо помнить, что D_{st} индекс рассчитывался по уравнению для бесконечно тонкого кольца с током, т.е. предполагалось, что все частицы находятся в этом кольце. В действительности дело обстоит иначе, частицы распределены в тороидальном объеме вокруг Земли на большом диапазоне расстояний; кроме того, для кольцевого тока и однородного магнитного поля условие осевой симметрии не выполняется, поэтому вычисление реального D_{st} индекса значительно усложняется. Тем не менее, проведенный анализ дает верхний предел максимальной силы кольцевого тока, при котором сохраняются области захвата. Учет асимметрии понизит этот порог, так как частицы будут иметь возможность покидать область захвата на ночной стороне, уходя на бесконечность через хвост магнитосферы или покидая магнитосферу через дневную магнитопаузу. В этом

случае «мост» между областью захвата и бесконечностью открывает возможность инжекции частиц плазменного слоя в область кольцевого тока с одновременным ускорением и увеличением числа захваченных частиц. Однако полученные величины, вероятно, могут свидетельствовать о том, что другие механизмы потерь начинают действовать раньше, чем будет достигнут верхний предел квазистационарного кольцевого тока найденный в данной главе.

В настоящее время известно несколько основных процессов, приводящих к распаду кольцевого тока [24]. Показано, что в процессе распада кольцевого тока нужно учитывать и ограничение на максимальный ток, описанное выше. Этот верхний предел приводит к ограничению силы кольцевого тока во время магнитной бури независимо от механизма потерь частиц из внутренней разрешенной области захвата. Максимально возможное число частиц, которые могут быть захвачены дипольным полем, определяется силой кольцевого тока, изменяющей «связность» областей Штермера. Используя описанный формализм, можно найти верхний предел максимального тока, который могут создавать захваченные частицы. В этом пороговом случае частицы кольцевого тока могут покинуть область захвата, что приводит к ослаблению кольцевого тока и уменьшению D_{st} индекса.

Четвертая глава посвящена исследованию динамики магнитосферы планеты на примере Земли во время сильных возмущений — магнитной бури, возникшей в результате резких изменений параметров межпланетной среды, после падения на магнитосферу коронального выброса мыссы, на фронте которого давление возрасло на столько, что магнитопауза переместилась до ~ 6 R_E и ее токовый слой зафиксировали магнитометры геостационарных спутников. Изложенные в четвертой главе результаты опубликованы в работе автора [A6]. Исследование магнитных бурь представляет большой интерес, так как токовые системы, определяющие глобальное магнитосферное магнитное поле, претерпевают сильные изменения, что позволяет выявить относительные их вклады в магнитные возмущения и лучше описать их пространственное распределение и, таким образом, существенно улучшить наше понимание глобальной структуры магнитосферы. Основной вклад в развитие магнитной бури в магнитосфере Земли вносят кольцевой ток и токи геомагнитного хвоста. Их изменения существенно влияют на понижение магнитного поля на поверхности Земли во время бури, которая численно описывается часовым D_{st} (или минутным SYM-H) индексом. Соотношение между вкладами этих токовых систем зависит от мощности бури, и из-за невозможности разделить эффекты магнитосферных токов в спутниковых измерениях определяется, главным образом, благодаря использованию моделей магнитосферы. Для изучения динамики токовых систем магнитосферы Земли была выбрана магнитная

буря 27 февраля 2023 года; изучение проводилось на основе одновременных наземных и космических измерений магнитного поля. Интерес данная буря представляла из-за наблюдавшихся в средних широтах полярных сияний при не столь низких значениях D_{st} индекса. Для описания магнитной бури 26-28 февраля 2023 года была выбрана параболоидная модель магнитосферы A2000. В ней магнитосферное магнитное поле состоит из двух слагаемых. Первое порождается внутриземными токами, второе — токами, текущими в магнитосфере. Внутриземное магнитное поле вычисляется по модели IGRF 13 [25]. Модель A2000 не зависит от какой-то конкретной базы данных измерений, что могло бы накладывать ограничения на область ее применимости, таким образом, модель может достаточно точно описывать магнитное поле как для спокойной, так и для сильно возмущенной магнитосферы. В каждый момент времени параметры модели определяют мгновенное состояние магнитосферы, а динамика магнитосферы может быть представлена как последовательность таких состояний.

В параболоидной модели магнитосферы A2000 магнитное поле внутри магнитосферы представляется в виде суперпозиции внутреннего поля планеты, поля токов на магнитопаузе, экранирующих поле внутриземных токов, поля токов хвоста магнитосферы, поля кольцевого тока, поля токов на магнитопаузе, экранирующих поле кольцевого тока, поля продольных токов зоны 1 и доли межпланетного магнитного поля, проникающей в магнитосферу. Входные параметры для модели определяются из эмпирических данных с использованием субмоделей. Это позволяет легко изменять параметризацию параболоидной модели. При моделировании вариаций SYM-H для данной бури не учитывались вклады продольных токов системы 1, так как они не вносят существенный вклад в симметричные возмущения на Земле [26] и вклад проникающего ММП, который составляет всего около 0.1-0.2 от величины межпланетного магнитного поля [27]. Параметры субмодели кольцевого тока были взяты из работы [26], в которой проводился анализ магнитной бури 24-26 сентября 1998 года со схожим минимумом D_{st}, составлявшим -200 нТл. Остальные входные параметры модели вычислялись на основе стандартных подходов, за исключением одного обновления: подсолнечное расстояние до магнитопаузы рассчитывается по формуле, полученной в работе [28] на основе данных о 17230 пересечений магнитопаузы 17 различными КА, которая заменила формулу Шу [29], ранее использовавшуюся в модели [27; 30; 31].

При помощи параболоидной модели магнитосферы были рассчитаны вклады в возмущение, связанные с разными источниками магнитосферного магнитного поля — токами на магнитопаузе, кольцевым ток и токами хвоста магнитосферы. Расчеты показали, что ток на магнитопаузе развивается первым, в самом начале бури, в ответ на сжатие магнитосферы солнечным ветром. В это время он дает основной вклад в SYM-H и ответственен за положительную вариацию магнитного поля в магнитосфере.

Ппонижение магнитного поля при развитии бури наблюдается позже и обусловлено, главным образом, развитием кольцевого тока и токов хвоста магнитосферы. Токовый слой хвоста начинает развиваться раньше, чем кольцевой ток, и начинает затухать, в то время как кольцевой ток продолжает развиваться. Глобальные изменения хвоста магнитосферы во время магнитной бури контролируются в основном солнечным ветром и ММП, но сопровождаются резкими вариациями, связанными с суббурями. Вклад кольцевого тока слегка больше вклада токового слоя хвоста, однако, согласно моделированию, именно последний дает наименьшее значение SYM-H. Полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями умеренных магнитных бурь [27; 31]. Для оценки надежности результатов расчетов по параболоидной модели было проведено сравнение наблюдаемое магнитное поле со спутников GOES-16 и GOES-18 с модельным магнитным полем вдоль траектории этих КА. Результаты расчетов по модели показали хорошее совпадение с данными наблюдений, но за некоторыми исключениями.

Наиболее сильный эффект расширения аврорального овала в рассматриваемой магнитной буре связан с резким ростом динамического давления солнечного ветра и последующим движением магнитопаузы к Земле, при котором она пересекала геостационарную орбиту, и КА GOES 18 оказывался за пределами магнитопаузы в переходном слое. Для иллюстрации этого эффекта были рассчитаны границы овала в полярной зоне и сечение магнитосферы в сечении полдень-полночь, соответственно. При сжатии магнитосферы на $\Delta R_{ss} = 3.4\ R_E$ размер аврорального овала увеличился в 1.5 раза, согласно модельным расчетам. Этот результат дает объснения появлению полярных сияний в средних широтах.

В **пятой главе** рассматривается один из механизмов, приводящих к возникновению полярных сияний на спутнике Юпитера Ганимеде. Изложенные в этой главе результаты опубликованы в работе автора [A1]. Магнитосфера Ганимеда, находящегося в потоке коротирующей магнитосферной плазмы Юпитера, представляет собой уникальный случай магнитосферы, постоянно находящейся в до-альвеновском потоке. В этом случае головная ударная волна не образуется, а открытые силовые линии не уходят в хвост магнитосферы, а формируют альвеновские крылья, перезамыкаются с силовыми линиями магнитного поля Юпитера и связывают полярную шапку Ганимеда с ионосферой планеты-Гиганта. Продольные токи, текущие вдоль поверхности альвеновских крыльев, со стороны Ганимеда могут замыкаться частично на «дневной» магнитопаузе, которая разделяет поток набегающей плазмы и магнитное поле Ганимеда на передней стороне, частично педерсеновскими токами в ионосфере Ганимеда и частично на «ночной» магнитопаузе в области нисходящего потока

плазмы [32]. В первом приближении магнитное поле Ганимеда можно представить как сумму поля диполя Ганимеда и внешнего для него однородного поля Юпитера.

Полярные свечения на Ганимеде являются результатом взаимодействия высыпающихся электронов плазменного диска Юпитера с атомами кислорода в довольно разреженной атмосфере Ганимеда. Существует фоновое свечение, не превышающее 100 Рэлей, на которое накладываются локализованные области повышенного излучения интенсивностью до 300 Рэлей [33]. Измеренные температуры и плотности тепловых электронов могут приводить к свечению с интенсивностью примерно в 10–40 Рэлей. Наблюдаемая же интенсивность в 300 Рэлей может быть достигнута, только если электроны будут существенно ускорены и будут характеризоваться максвелловским распределением с температурой в диапазоне 75–300 эВ [34]. Также регистрируется и более разреженная надтепловая компонента, плотность которой однако слишком мала для генерации требуемой интенсивности свечения. Таким образом, окружающие Ганимед электроны имеют энергию и плотность, недостаточные для возбуждения свечения в наблюдаемых линиях.

В работе [34] были предложены следующие механизмы генерации постоянного фонового излучения и интенсивных авроральных пятен: продольное ускорение электрическими полями и стохастическое ускорение частиц электростатическими волнами. В работе [35] на основании МГД-моделирования было высказано предположение о том, что основным источником электронов, генерирующих авроральные сияния на Ганимеде на стороне набегающего потока, является Юпитерианская плазма, проникающая через каспы, тогда как полярные сияния в области нисходящего потока генерируются электронами, которые ускоряются вдоль линии пересоединения и проникают в атмосферу Ганимеда на широтах границы между открытыми и замкнутыми силовыми линиями. В данной главе диссертации рассмотрен механизм возникновения продольной разности потенциалов на авроральных силовых линиях.

При движении проводника (в данном случае ионосферы Ганимеда) поперек магнитного поля возникает индуцированное электрическое поле. Электрическое поле возникает также на всем протяжении плазменного слоя поперек альвеновского крыла, в результате чего в цепи появляется электродвижущая сила (ЭДС). Так как магнитные силовые линии границы альвеновского крыла проецируются на авроральный овал Ганимеда, то возникающая ЭДС будет приложена к ионосфере Ганимеда в области аврорального овала. Была рассчитана величина электрического поля, создаваемого в магнитосфере Ганимеда при движении через плазму магнитосферы Юпитера (0.0139 В/м) и разность потенциалов между двумя крайними частями магнитосферы, где текут продольные токи (238 кВ).

В результате был рассчитан ионосферный ток, как произведение разности потенциалов и интегральной педерсеновской проводимости ионосферы Ганимеда, равной приблизительно 2 Сименсам [36], с учетом того, что втекающий продольный ток распределен по $\cos\varphi$ [37]. В этом случае полный ионосферный ток равен 471.25 кА. Плотность же тока j_e, который могут создать наблюдавшиеся электроны, будет находится в диапазоне $(2.12 - 8.48) \times 10^{-6}$ А/м^2. С учетом распределения втекающего тока электронов по $\cos\varphi$ и размера области, в которой наблюдаются свечения от 32° до 42° широты [38], суммарный ток электронов равен $(4.09 - 16.35) \times 10^6$ А. С учетом эффекта магнитной фокусировки отношение потоков на бесконечности и на уровне ионосферы Ганимеда равно 0.026. Так как ток прямо пропорционален числу частиц, суммарный ток J_e, который могут обеспечить электроны, будет равен J_e = 106 – 425 кА, что недостаточно для необходимого тока в 471.25 кА, поэтому был сделан вывод, что тепловые электроны должны доускоряться для обеспечения необходимого тока в системе.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты изложены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, и одном тексте доклада.

Список публикаций в Web of Science/Scopus:

А1. **Лаврухин А. С.**, Алексеев И. И. Авроральное свечение в высоких широтах Ганимеда // Письма в Астрономический журнал. — 2015. — Т.41, № 11. — С. 744–750. — Импакт-фактор РИНЦ 2018: 0.839. — Объем 0.81 печ. л. // Переводная версия: **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I. Aurora at High Latitudes of Ganymede // Astronomy Letters. — 2015. — V.41, № 11. — P. 744–750. — Web of Science JIF 2022: 1.384. — Объем 0.69 печ. л. Личный вклад 85%.

А2. **Lavrukhin A. S.**, Alexeev, I. I., Tyutin, I. V. Influence of the Earth's ring current strength on Størmer's allowed and forbidden regions of charged particle motion // Annales Geophysicae. — 2022. — V.37. — P. 535–547. — Web of Science JIF 2022: 1.882. — Объем 1.50 печ. л. Личный вклад 80%.

А3. Лукашенко, А. Т., **Лаврухин, А. С.**, Алексеев, И. И., Беленькая, Е. С. Возможность существования захваченной радиации у Меркурия // Письма в Астрономический Журнал. — 2020. — Т.46, № 11. — С. 814–826. — Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0.839. — Объем 1.50 печ. л. // Переводная версия: Lukashenko, A. T., **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I., Belenkaya, E. S. Possibility of the Existence of Trapped Radiation near Mercury // Astronomy Letters. — 2020. —

V.46, № 11. — P. 814–826. — Web of Science JIF 2022: 1.384. — Объем 1.39 печ. л. Личный вклад 30%.

A4. Невский, Д. В., **Лаврухин, А. С.**, Алексеев, И. И. Автоматическое определение положения головной ударной волны и магнитопаузы магнитосферы меркурия по данным магнитометра космического аппарата MESSENGER // Космические Исследования. — 2023. — Т.61, № 3. — С. 189–201. — Импакт-фактор РИНЦ 2022: 0.820. — Объем 1.50 печ. л. // Переводная версия: Nevskii, D. V., **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I. Automatic Detection of Bow Shock and Magnetopause Positions at Mercury's Magnetosphere Using MESSENGER Magnetometer Data // Cosmic Research. — 2023. — V.61, № 3. — P. 189—201. — Web of Science 2022 JIF: 0.656. — Объем 1.39 печ. л. Личный вклад 40%.

A5. Nevsky, D., **Lavrukhin, A.**, Alexeev, I. Mercury's Bow Shock and Magnetopause Variations According to MESSENGER Data // Universe. — 2024. — V.10 № 40. — Web of Science 2022 JIF: 2.278. — Объем 1.39 печ. л. Личный вклад 40%.

A6. **Lavrukhin, A. S.**, Alexeev, I. I., Belenkaya, E. S., Kalegaev, V. V., Nazarkov, I. S., Nevsky, D. V. Magnetosphere and auroral oval dynamics during February 27, 2023 magnetic storm // Cosmic Research. — 2024. — V.62 № 2. — Web of Science 2022 JIF: 0.656. — Объем 1.85 печ. л. Личный вклад 50%.

Иные публикации:

A7. Julka, S., Kirschstein, N., Granitzer, M., **Lavrukhin, A.**, Amerstorfer, U., Deep Active Learning for Detection of Mercury's Bow Shock and Magnetopause Crossings // Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, ed. Amini, M.-R., Canu, S., Fischer, A., Guns, T., Kralj Novak, P., Tsoumakas, G. — 2023. — P. 452–467. Объем 1.85 печ. л. Личный вклад 20%.

Список литературы

1. Modular model for Mercury's magnetospheric magnetic field confined within the average observed magnetopause / H. Korth [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2015. — Т. 120, № 6. — С. 4503—4518.
2. A Dynamic Model of Mercury's Magnetospheric Magnetic Field / H. Korth [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2017. — Т. 44, № 20. — С. 10, 147—10, 154.
3. *Tsyganenko, N. A.* Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause / N. A. Tsyganenko // Journal

of Geophysical Research: Space Physics. — 1995. — T. 100, A4. — C. 5599—5612.

4. *Tsyganenko, N. A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 1. Mathematical structure / N. A. Tsyganenko // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2002. — T. 107, A8. — SMP 12-1-SMP 12—15.

5. *Tsyganenko, N. A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 2. Parameterization and fitting to observations / N. A. Tsyganenko // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2002. — T. 107, A8. — SMP 10-1-SMP 10—17.

6. The Shape of Mercury's Magnetopause: The Picture From MESSENGER Magnetometer Observations and Future Prospects for BepiColombo / L. C. Philpott [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2020. — T. 125, № 5. — e2019JA027544.

7. A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape / J.-H. Shue [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1997. — T. 102, A5. — C. 9497—9511.

8. Mercury's three-dimensional asymmetric magnetopause / J. Zhong [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2015. — T. 120, № 9.

9. *Kobel, E.* A model of the steady state magnetic field in the magnetosheath / E. Kobel, E. O. Flückiger // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1994. — T. 99, A12. — C. 23617—23622.

10. Paraboloid model of Mercury's magnetosphere / I. I. Alexeev [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — T. 113, A12.

11. Mercury's magnetospheric magnetic field after the first two MESSENGER flybys / I. I. Alexeev [и др.] // Icarus. — 2010. — T. 209, № 1. — C. 23—39.

12. MESSENGER observations of induced magnetic fields in Mercury's core / C. L. Johnson [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2016. — T. 43, № 6. — C. 2436—2444.

13. Observational evidence of ring current in the magnetosphere of Mercury / J.-T. Zhao [и др.] // Nature Communications. — 2022. — T. 13, № 1.

14. MESSENGER Observations of Transient Bursts of Energetic Electrons in Mercury's Magnetosphere / G. C. Ho [и др.] // Science. — 2011. — T. 333, № 6051. — C. 1865—1869.

15. Electron dynamics during substorm dipolarization in Mercury's magnetosphere / D. C. Delcourt [и др.] // Annales Geophysicae. — 2005. — T. 23, № 10. — C. 3389—3398.

16. *Delcourt, D. C.* Ion dynamics during compression of Mercury's magnetosphere / D. C. Delcourt, T. E. Moore, M.-C. H. Fok // Annales Geophysicae. — 2010. — Т. 28, № 8. — С. 1467—1474.

17. Energetic particle dynamics in Mercury's magnetosphere / B. M. Walsh [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2013. — Т. 118, № 5. — С. 1992—1999.

18. *Størmer, C.* The Polar Aurora / C. Størmer. — Oxford, U.K. : Clarendon, 1955.

19. *Shebalin, J. V.* Størmer regions for axisymmetric magnetic multipole fields / J. V. Shebalin // Physics of Plasmas. — 2004. — Т. 11, № 7. — С. 3472—3482.

20. Current Systems in Planetary Magnetospheres and Ionospheres / W. Baumjohann [и др.] // Space Science Reviews. — 2010. — Т. 152, № 1. — С. 99—134.

21. *Ковтюх, А. С.* Буревой кольцевой ток / А. С. Ковтюх, П. М. И. // Плазменная гелиогеофизика. Т. 1 / под ред. Л. М. Зеленый, И. С. Веселовский. — Москва : Физматлит, 2008. — Гл. 4. С. 534—552. — 2 т.

22. The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay / I. A. Daglis [и др.] // Reviews of Geophysics. — 1999. — Т. 37, № 4. — С. 407—438.

23. *Prölss, G. W.* Physics of the Earth's Space Environment / G. W. Prölss. — Springer Berlin Heidelberg, 2004. — 513 с.

24. *Ebihara, Y.* Numerical Simulation of the Ring Current: Review / Y. Ebihara, M. Ejiri // Space Science Reviews. — 2003. — Т. 105, № 1. — С. 377—452.

25. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation / P. Alken [и др.] // Earth, Planets and Space. — 2021. — Т. 73, № 1. — С. 49.

26. Case study of September 24–26, 1998 magnetic storm / S. Y. Bobrovnikov [и др.] // Advances in Space Research. — 2005. — Т. 36, № 12. — С. 2428—2433.

27. *Alexeev, I. I.* Modeling of geomagnetic field during magnetic storms and comparison with observations / I. I. Alexeev, Y. I. Feldstein // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2001. — Т. 63, № 5. — С. 431—440.

28. Massive Multi-Mission Statistical Study and Analytical Modeling of the Earth's Magnetopause: 2. Shape and Location / G. Nguyen [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2022. — Т. 127, № 1. — e2021JA029774.

29. Magnetopause location under extreme solar wind conditions / J.-H. Shue [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1998. — Т. 103, A8. — С. 17691—17700.

30. Magnetic storms and magnetotail currents / I. I. Alexeev [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1996. — Т. 101, A4. — С. 7737—7747.

31. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms / V. V. Kalegaev [и др.] // Annales Geophysicae. — 2005. — Т. 23, № 2. — С. 523—533.

32. Three-dimensional MHD simulations of Ganymede's magnetosphere / X. Jia [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — Vol. 113, A6.

33. HST/STIS Ultraviolet Imaging of Polar Aurora on Ganymede / P. D. Feldman [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2000. — Т. 535, № 2. — С. 1085.

34. Excitation of the Ganymede Ultraviolet Aurora / A. Eviatar [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2001. — Т. 555, № 2. — С. 1013.

35. *Payan, A. P.* Uncovering local magnetospheric processes governing the morphology and variability of Ganymede's aurora using three-dimensional multifluid simulations of Ganymede's magnetosphere / A. P. Payan, C. S. Paty, K. D. Retherford // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2015. — Т. 120, № 1. — С. 401—413.

36. Magnetospheric interactions with satellites / M. G. Kivelson [и др.] // Jupiter. The Planet, Satellites and Magnetosphere / под ред. W. B. M. F. Bagenal T. E. Dowling. — Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2007. — Гл. 21. С. 513—536.

37. *Alexeev, I. I.* A model of region 1 field-aligned currents dependent on ionospheric conductivity and solar wind parameters / I. I. Alexeev, E. S. Belenkaya, C. R. Clauer Jr. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2000. — Vol. 105, A9. — P. 21119—21127.

38. Aurora on Ganymede / M. A. McGrath [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2013. — Т. 118, № 5. — С. 2043—2054.

Подписано в печать ___.___._____. Заказ № _____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Типография _____