

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Дмитриев Алексей Владимирович

**Аномальные явления в области взаимодействия солнечного ветра
с дневной магнитосферой Земли на низких широтах**

Специальность: 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2025

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

Официальные - Григоренко Елена Евгеньевна
оппоненты

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела физики космической плазмы Института космических исследований Российской академии наук

Мишин Владимир Виленович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела физики атмосферы и околоземного космического пространства Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Соловьев Анатолий Александрович

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор Геофизического центра Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории геоинформатики Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук

Защита состоится 3 апреля 2025 года в 13:30 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

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3320>

Автореферат разослан 24 января 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

К концу XX века сформировались базовые представления о структуре магнитосферы и солнечно-земных связях. Большой объем экспериментальных данных, накопленных за 40 лет космической эры, позволил сформировать четкое понимание области взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитосферой и ее пограничных областей. Область взаимодействия включает в себя магнитопаузу, магнитослой, головную ударную волну и область форшока [Spreiter et al., 1966; Spreiter and Alksne, 1969; Haerendel & Paschmann, 1975; Fairfield et al., 1990].

Внешняя граница магнитосферы, магнитопауза, контролируется динамическим давлением солнечного ветра (P_d) и северо-южной B_z компонентой межпланетного магнитного поля (ММП). Головная ударная волна (ГУВ) формируется перед магнитопаузой вследствие того, что скорость солнечного ветра выше магнитозвуковой скорости, и контролируется звуковым и альфвеновским числами Маха. Между ГУВ и магнитопаузой формируется область магнитослоя, где поток плазмы солнечного ветра тормозится и обтекает магнитосферу. Перед сектором ГУВ, где вектор ММП квазипараллелен нормали к ГУВ, образуется форшок, область солнечного ветра турбулизованного ускорением частиц и повышенной волновой активностью.

В 90-е годы был разработан целый ряд эмпирических моделей для описания области взаимодействия [см. обзоры A7; A27], а также глобального магнитосферного магнитного поля и токов [Tsyganenko, 1996, Alexeev et al., 1996]. Начали бурно развиваться комплексные глобальные модели магнитосферы и пограничных областей, объединяющие приближение магнитной гидродинамики (МГД) с эмпирическими моделями, такие как глобальные модели NASA/CCMC [<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/>].

В то же самое время, бурное развитие микроэлектронных технологий привело к использованию элементов высокой степени интеграции, обладающих меньшей устойчивостью к космической радиации и надтепловой плазме, что

вызывает сбои в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) и даже потери спутников. Это стало одной из причин развития нового направления в физике солнечно-земных связей, космической погоды. Новое междисциплинарное направление объединило исследователей из различных областей геофизики, космофизики и физики Солнца по всему миру, в том числе и в России [А8]. Исследования негативных эффектов космической погоды убедительно показали, что существовавшие на тот момент представления и модели не соответствуют требованиям безопасности космических миссий [Гальперин и др., 2001]. Серьезные проблемы возникали на геостационарных спутниках, которые во время магнитных бурь внезапно пересекали магнитопаузу, и оказывались в магнитослое. Геостационарные и высокоапогейные КА также подвергались воздействию интенсивных потоков энергичных и релятивистских заряженных частиц радиационного пояса Земли (РПЗ) и солнечных космических лучей (СКЛ), вызывающих сбои в работе электроники и сильные электрические разряды на спутниках [Paul Cannon, FREng, 2013]. Вследствие этого потребовалось совершенствовать существующие модели магнитосферы и области взаимодействия в применении к сильным геомагнитным возмущениям.

Для всестороннего исследования проблем солнечно-земных связей в 1990-х годах были запущены высокоапогейные КА Geotail, Interball, Cluster, а также межпланетные мониторы Wind, SOHO и ACE, которые дали огромное количество экспериментальной информации об условиях в межпланетной среде и соответствующих им процессах в магнитосфере Земли. В результате было обнаружено множество новых и, порой, необъяснимых явлений в магнитосфере и в области взаимодействия ее с солнечным ветром.

В частности, было показано, что во время магнитных бурь магнитопауза перестает реагировать на рост отрицательной V_z -компоненты, когда она превышает некоторый порог около -20 нТ, т.н. эффект насыщения воздействия V_z [Кузнецов и Суворова, 1997; А4]. Кроме того, было обнаружено, что пересечения магнитопаузой геостационарной орбиты в предполуденном секторе наблюдались чаще и при меньших давлениях солнечного ветра, чем пересечения

в послеполуденном секторе, т.н. эффект асимметрии утро-вечер. Данный эффект отличается от известной асимметрии магнитопаузы и развития на ней неустойчивости Кельвина-Гельмгольца при слабозмущенных условиях, которая определяется ориентацией ММП вдоль Паркеровской спирали [Mishin, 1981; 2005]. Он также отличается от асимметрии ионосферной конвекции в области высоких широт, которая контролируется V_y компонентой ММП и противоположна в северном и южном полушариях [Cowley & Lockwood, 1992].

При невозмущенных условиях было обнаружено несколько очень удаленных пересечений магнитопаузы, которые находились на 20% дальше модельных предсказаний [Merka et al., 2003]. Эти пересечения были связаны с квазирадиальной ориентацией ММП, когда доминирует V_x компонента, и объяснялись сильными вариациями плотности солнечного ветра в области подсолнечного форшока. На фланге магнитослоя были обнаружены аномальные сверхэнергичные транзиентные потоки плазмы, интенсивность которых в несколько раз превосходила поток солнечного ветра [Nemechek et al., 1998]. Эти структуры также были приписаны к возмущающему воздействию форшока. Некоторые теоретические работы уже тогда предсказывали формирование сверхэнергичных структур в магнитослое и описывали их возможное взаимодействие с магнитопаузой [Mishin, 1993; Lin et al., 1996].

Обнаруженные явления на магнитопаузе и в магнитослое не вписывались в существующие тогда представления. Более того, некоторые из них формально нарушали фундаментальные законы сохранения энергии-импульса. Однако в то время всесторонний анализ и физическая интерпретация этих явлений были невозможны вследствие сильной ограниченности экспериментальных данных и малой статистики событий. Более того, для их объяснения требовалось применение кинетического подхода, что было затруднительно в условиях ограниченности пространственного и временного разрешения космических экспериментов.

В 2000-е годы быстро накапливались данные с геостационарных спутников и с высокоапогейных КА Cluster и THEMIS, которые измеряли плазму и

магнитные поля в области взаимодействия с очень высоким временным и пространственным разрешением. Главным отличительным достоинством миссии THEMIS являлось расположение пяти спутников практически вдоль одной радиальной линии, по принципу жемчужного ожерелья. Такая конфигурация впервые обеспечила возможность проведения одновременных измерений в магнитослое, магнитосфере и/или в межпланетной среде, что позволяло анализировать процессы непосредственно в ключевой цепи взаимодействий солнечный ветер – магнитослой - магнитосфера.

Огромный массив новых экспериментальных данных требовал развития новых подходов для их обработки и анализа. Возникла необходимость в совершенствовании методик по идентификации пограничных областей и статистическому анализу пересечений их границ космическими аппаратами. Кроме того, появилась возможность более достоверного определения условий в межпланетной среде на основе данных, полученных одновременно с нескольких мониторов. Это позволило провести принципиально новый более глубокий научный анализ обнаруженных ранее явлений, определить их физическую природу, усовершенствовать существующие модели взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой и уточнить его воздействие на динамику околоземной радиации.

В последние годы появились свидетельства о необычных явлениях в динамике солнечной активности, условиях в межпланетной среде и в геомагнитном поле в течение 24-го цикла солнечной активности. В частности, показано существенное уменьшение средней напряженности ММП и плотности солнечного ветра [Ermolaev et al., 2022]. В магнитном поле Земли обнаружены значительные аномалии на высоких широтах в диапазоне долгот Сибири [Gvishiani et al., 2014], а именно, наземные магнитные станции регистрируют магнитное поле, существенно отличающееся от предсказаний стандартной модели IGRF-12. Налицо явные указания значительных изменений в условиях формирования магнитосферы. Это требует четкого определения точности и

диапазона применимости существующих моделей с целью их верификации и модификации для новых условий в цепи солнечно-земных связей.

Таким образом, исследование области взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром остается чрезвычайно актуальной задачей. Представленные в диссертации результаты являются одним из предметов верификации и более глубокого анализа для будущих космических миссий, основанных на передовых технологиях дистанционного зондирования магнитосферы, таких как проекты SMILE [Jorgensen et al., 2019] и STORM [Sibeck et al., 2023]. Новые эксперименты предназначены для решения одной из важнейших проблем солнечно-земных связей: получить одновременно локальные характеристики межпланетной среды и соответствующую им глобальную картину динамики магнитосферы и ее взаимодействия с солнечным ветром.

Цели и задачи диссертационной работы

В настоящей диссертации представлены результаты комплексного анализа современных данных о плазме, магнитных полях и потоках энергичных частиц, полученных различными КА в области магнитопаузы, магнитослоя и ГУВ за последние 25 лет. Сравнение полученных результатов с существующими моделями позволило обнаружить целый ряд аномальных и новых явлений в области взаимодействия, глубже понять природу динамики магнитосферы при ее взаимодействии с солнечным ветром и уточнить существующие модели.

Основной целью диссертационной работы является исследование аномалий в геометрии и динамике области взаимодействия дневной магнитосферы Земли с солнечным ветром на основе оригинальной комплексной методики анализа современных экспериментальных данных, полученных на различных КА, а также на мировой сети наземных станций.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Сбор комплексного массива экспериментальных данных с нескольких КА по наблюдению условий в межпланетной среде, в магнитосфере Земли, а также

наземных магнитных и ионосферных измерений за два последних солнечных цикла в период с 1997 по 2019гг.

2. Разработка оригинальной методики комплексного анализа разнородных данных с целью верификации их достоверности, вычисления ключевых физических параметров космической среды, определения структуры области взаимодействия и сравнения экспериментальных результатов с существующими моделями.
3. Определение геометрии и динамики дневной магнитопаузы во время сильных геомагнитных бурь, вызванных воздействием на магнитосферу быстрого солнечного ветра и сильного ММП южной направленности.
4. Моделирование влияния динамики магнитосферы и магнитопаузы на космическую радиацию: потоки релятивистских электронов во внешнем РПЗ и проникновение СКЛ в полярные шапки Земли.
5. Исследование аномального расширения магнитосферы при квазирадиальной ориентации ММП.
6. Всесторонний анализ сверхэнергичных плазменных струй в магнитослое: их свойства, происхождение, воздействие на магнитопаузу, геофизические эффекты в магнитосфере и ионосфере.

Объект и предмет исследования

Объектом данного исследования является природа солнечно-земных связей, т.е. механизмы воздействия солнечной радиации и солнечного ветра на магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли. К наиболее важным явлениям в этой области относятся возрастания потоков солнечных космических лучей и геомагнитные бури, которые являются следствием солнечных вспышек и выбросов корональных масс. Существующие экспериментальные методы и модели не всегда способны адекватно диагностировать возмущения от Солнца и предсказывать их воздействие на магнитосферу. С другой стороны, при спокойных условиях был обнаружен целый ряд необъяснимых явлений в фоновой динамике магнитосферы и ионосферы, в частности, сильное расширение

магнитосферы, магнитные вариации, связанные с импульсами давления, высыпания энергичных частиц на высоких широтах. Некоторые из них связывают с неоднородностями в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле, другие пытаются объяснить внутримангнитосферными источниками.

Предметом данного исследования является область взаимодействия дневной магнитосферы с солнечным ветром, которая непосредственно участвует в переносе возмущений от Солнца, транспорте энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли и трансформации энергии солнечного ветра в энергию магнитосферных процессов. Исследование области взаимодействия и ее составных частей, таких как магнитопауза, магнитослой, головная ударная волна и форшок, позволяет подойти к определению ключевых физических параметров, описывающих состояние и динамику этих составных частей в связи с изменением условий в межпланетной среде. С этой целью в настоящей работе развиты новые методики, включающие существующие представления и модели, которые позволяют находить и эффективно анализировать новые и аномальные явления в комплексной цепи солнечно-земных связей.

Научная новизна

Основные результаты диссертационной работы заключаются в обнаружении и объяснении новых режимов энергетического баланса в области взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитосферой и их геофизические эффекты. А именно, получены следующие новые результаты:

1. Разработан оригинальный комплекс программного обеспечения с визуальным представлением разнородных данных, включая космофизические эксперименты, наземные станции и модельное представление области взаимодействия, для всестороннего анализа, как отдельных событий, так и их статистики.
2. Впервые проведен детальный анализ геометрии магнитопаузы в области геостационарной орбиты при больших отрицательных значениях B_z компоненты ММП, который позволил обнаружить (а) статистически значимое доказательство

расширения магнитосферы в послеполуденном секторе по сравнению с предполуденным и (б) формирование на поверхности магнитопаузы углубления, вытянутого вдоль экватора, так называемого, экваториального желоба.

3. Доказан эффект насыщения воздействия ММП V_z на положение дневной магнитопаузы, и впервые обнаружена сильная зависимость этого эффекта от текущего уровня магнитной бури.

4. На основе обнаруженных эффектов разработаны новые модели внешней магнитосферы во время геомагнитных бурь: модель магнитопаузы на геостационарной орбите, модель возрастных релятивистских электронов на геостационарной орбите и модель проникновения СКЛ в полярные шапки.

5. Впервые показано аномальное уменьшение плотности энергии в магнитослое и глобальное расширение магнитосферы при квазирadiaльной ориентации ММП.

6. Впервые проведен всесторонний анализ большой статистики крупномасштабных, длительностью более 30 сек, сверхэнергичных плазменных струй в магнитослое, плотность энергии которых выше, чем плотность энергии набегающего солнечного ветра. Обнаружено, что они генерируются главным образом при взаимодействии головной ударной волны с межпланетными разрывами.

7. Впервые описаны основные эффекты взаимодействия сверхэнергичных плазменных струй магнитослоя с магнитопаузой, такие как сильная локальная компрессия и прямое проникновение плазмы магнитослоя в магнитосферу.

8. Впервые показано, что локальная компрессия, вызванная геоэффективными сверхэнергичными плазменными струями магнитослоя, вызывает высыпания энергичных частиц из области захвата в атмосферу, что, в свою очередь, приводит к локальной генерации электромагнитных ионно-циклотронных волн и Pc1 пульсаций в магнитосфере, а также возрастанию ионизации нижней ионосферы на высоких широтах.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты анализа аномальных явлений позволили существенно уточнить существующие эмпирические модели взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром, такие как: качественная модель пересечения магнитопаузой геосинхронной орбиты, модель возрастаний потоков релятивистских электронов РПЗ на геостационарной орбите и модель проникновения СКЛ в полярные шапки, а также определить ионизационные эффекты РПЗ и СКЛ в высокоширотной атмосфере и ионосфере. Новые данные об аномальных явлениях в магнитосфере при спокойных условиях в солнечном ветре открывают возможность для дальнейшего развития теоретического и модельного представлений фоновой динамики магнитосферы и ионосферы.

Методология диссертационного исследования

Сбор космофизических данных по плазме, магнитному полю и энергичным частицам в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли. Разработка методики автоматического определения пограничных областей магнитосферы по магнитным и плазменным данным. Визуализация и комплексный анализ воздействия межпланетных параметров на динамику области взаимодействия. Идентификация аномальной геометрии и динамики области взаимодействия по сравнению с модельными предсказаниями. Совершенствование моделей возмущающего воздействия межпланетной среды на магнитосферу и ионосферу.

Положения, выносимые на защиту:

1. Асимметрия утро-вечер магнитопаузы на главной фазе сильных магнитных бурь обусловлена расширением магнитосферы в послеполуденном и вечернем секторах вследствие сильного асимметричного кольцевого тока с максимумом в послеполуденном секторе.

2. Эффект насыщения влияния отрицательной V_z компоненты межпланетного магнитного поля на положение дневной магнитопаузы во время сильных магнитных бурь может быть связан с вкладом теплового давления мощного кольцевого тока в баланс давлений на границе дневной магнитосферы аномально малых размеров.
3. Учет эффекта насыщения влияния межпланетного магнитного поля и асимметрии утро-вечер повышает точность моделей магнитопаузы, возрастных релятивистских электронов на геостационарной орбите, а также границ проникновения солнечных космических лучей в полярной шапке во время геомагнитных бурь.
4. Аномальное глобальное расширение магнитопаузы при квазирадиальном межпланетном магнитном поле вызвано существенным падением (более 40%) плотности энергии надтепловой плазмы в магнитослое. Недостаток энергии может быть объяснен кинетическим эффектом ускорения энергичных ионов в подсолнечном фэршоке, уносящих до 40% и более плотности энергии без взаимодействия с магнитопаузой.
5. Крупномасштабные сверхэнергичные плазменные струи в магнитослое длительностью >30 секунд имеют поперечный и продольный пространственные масштабы 1 и 10 земных радиусов, соответственно. Они окружены областью с пониженной плотностью энергии, что приводит к характерной локальной деформации магнитопаузы типа расширение – сжатие – расширение. Такая структура обеспечивает сохранение полной энергии в масштабах всей структуры плазменной струи.
6. Крупномасштабные сверхэнергичные плазменные струи генерируются в магнитослое в двух третьих случаев при взаимодействии межпланетных разрывов с головной ударной волной, остальные генерируются в условиях квазирадиального межпланетного магнитного поля.
7. Условия прямого проникновения плазмы магнитослоя в магнитосферу при воздействии сверхэнергичных плазменных струй на магнитопаузу определяются сочетанием двух механизмов: импульсного проникновения плазмоида через

магнитный барьер и конечным ларморовским радиусом ионов плазмоида в магнитной ловушке.

8. Воздействие сверхэнергичных плазменных струй на дневную магнитосферу вызывает ряд геофизических эффектов, таких как высыпание энергичных частиц из области захвата, локальная генерация электромагнитных ионно-циклотронных волн и геомагнитных пульсаций типа «жемчужин» в диапазоне 0.2 - 5 Гц, повышение ионизации верхней атмосферы и интенсификация спорадического слоя Es ионосферы на высоких широтах.

Степень достоверности

Достоверность результатов определяется высокой информативностью космофизических данных, полученных из различных космических и наземных экспериментов. Наличие нескольких КА позволило выполнить кроссвалидацию данных, а также провести фильтрацию сбоев и оценить достоверность экспериментально полученных величин параметров межпланетной среды и магнитосферы. Построенные в итоге эмпирические модели показали хорошую точность при их использовании другими исследователями.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на международных конференциях и симпозиумах:

1. StatPhys-Taipei-1997 International Workshop, Taipei, Taiwan, 1997
2. International Symposium "Space Plasma Studies by In-Situ and Remote Measurements" Moscow, 1998
3. ESA Workshop on Space Weather, 11-13 November, 1998, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands
4. EGS XXIV General Assembly, 22 April 1999, The Hague, The Netherlands
5. IUGG99 The 22nd General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics the University of Birmingham, UK, 1999

6. 33rd Scientific Assembly of COSPAR 16-23 July, 2000
7. IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly, Hanoi, Vietnam, 18-31 August 2001
8. Western Pacific Geophysics Meeting, Wellington, New Zealand, July 9-12, 2002
9. NATO Advanced Research Workshop "Effects of Space Weather on Technology Infrastructure (ESPRIT)", Rhodes, Greece, 25-29 March 2003
10. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 7-11 April 2003
11. AGU Chapman Conference on Physics and Modelling of the Inner Magnetosphere, Helsinki, Finland, August 25-29, 2003
12. ISEC2003, Radiation Belt Science, Toulouse, France, September 2-5, 2003
13. 2004 Western Pacific Geophysics Meeting, Honolulu, Hawaii, 16-20 August 2004
14. AOGS2007 Bangkok, Thailand, 30 July - 3 August 2007
15. AGU 2009 Joint Assembly, Toronto, Ontario, Canada, 24-27 May 2009
16. The 2nd International Space Weather Symposium, China, October 17-21, 2009
17. 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, 22-25 June 2010
18. 7th AOGS Annual Meeting, Hyderabad, India, 5-9 July 2010
19. Fall AGU Meeting, San-Francisco, USA 13-17 December, 2010
20. EGU Meeting, Vienna, Austria, 7-11 April 2011
21. AOGS Annual Meeting, Taipei, Taiwan, 8-12 August 2011
22. International Space Plasma Symposium (ISPS), Taiwan, 15 – 19 August 2011
23. International Living With a Star Workshop, China, 28 August – 2 September 2011
24. POLAR2012, IZMIRAN, Troitsk, Russia, 22-26 May 2012
25. Geospace Environment Modeling (GEM) Mini-Workshop, San-Francisco, USA, December 2, 2012
26. Fall AGU Meeting, San-Francisco, USA, 3-7 December, 2012
27. Taiwan Geosciences Assembly, Tainan, 13-17 May, 2013
28. International Science and Application Conference POLAR 2014, Salehard, Russia, 13-17 April 2014
29. AOGS 11th Annual Meeting Sapporo, Japan 28 July - 01 August 2014
30. 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, 2-10 August 2014

- 31.JpGU-2015 meeting Tokyo, Japan, 23 - 30 May 2015, A. Dmitriev, Recurrent ionospheric storms during solar minimum
- 32.AOGS 12th Annual Meeting, Singapore 2 - 7 Aug, 2015
- 33.Taiwan Geosciences Assembly, 16 – 20 May 2016, Taipei, Taiwan
- 34.JpGU-2016, 22 – 26 May, 2016, Tokyo, Japan
- 35.V International Conference "Atmosphere, Ionosphere, Safety" (AIS-2016), 19-25, June 2016, Kaliningrad, Russia
- 36.AOGS 13th Annual Meeting, 1 – 5 August 2016, Beijing, China
- 37.Second VarSITI General Symposium, 10 - 15 July 2017 Irkutsk, Russia
- 38.JpGU2018, 20 – 24 May 2018, Japan, A.V. Dmitriev, Recurrent ionospheric storms.
- 39.VI International Conference "Atmosphere, Ionosphere, Safety" (AIS-2018), 03 - 09 June 2018, Kaliningrad, Russia
- 40.12th Russian-Mongolian International Conference on Astronomy and Geophysics, 1 - 5 October 2018, Irkutsk, Russia
- 41.International Workshop Eruptive energy release processes on the Sun and stars: origins and effects, 10 - 12 October 2018, Irkutsk, Russia
- 42.AOGS 16th Annual Meeting, 28 Jul - 2 Aug 2019, Singapore, A. V. Dmitriev, Geosynchronous Magnetopause Crossings in the 24 Solar Cycle
- 43.X Anniversary International Conference, Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors, October 1-5, 2019, Paratunka, Kamchatka, Russia
- 44.XI International Conference Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors, September 22-25, 2020, Paratunka, Kamchatka, Russia
- 45.JpGU-AGU-2021 Virtual Meeting, Tokyo, Japan May 30 - June 1, 2021
- 46.XXVII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics" Moscow, Russia, July 05-09, 2021
- 47.AOGS Annual Virtual Meeting, Singapore, 1-6 August 2021
- 48.XII International Conference on Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors Paratunka, Kamchatka, Russia, Sep. 27 – Oct. 01, 2021
- 49.JPGU Virtual Meeting, May 22 - June 2, 2022, Tokyo, Japan
- 50.Taiwan Geosciences Assembly, Taipei, Taiwan, 7-9 June, 2022

51. COSPAR 44th Scientific Assembly, Athens, Greece, 16 - 24 July 2022
52. AOGS Annual Virtual Meeting, Australia, 01 to 05 August 2022
53. Problems of Geocosmos - 2022 XIV International Conference and School, St. Petersburg, Russia, 3 - 7 October 2022
54. "Физика плазмы в солнечной системе" ИКИ РАН, Москва, Россия, 6-10 февраля 2023 г.
55. The 46th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena" Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia 13-17 March 2023
56. "Проблемы космофизики" имени М.И. Панасюка, Дубна, Россия, 10-13 июля 2023.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Автор внес основной вклад в работы A1(80%), A3(80%), A4(80%), A5(90%), A6(100%), A7(90%), A8(60%), A10(80%), A11(80%), A12(90%), A13(80%), A14(70%), A17(100%), A18(80%), A19(90%), A21(90%), A22(95%), A23(90%), A24(90%), A25(60%), A26(90%), A28(80%), A32(95%), A33(90%) и A34(100%).

В работах A1, A5, A7, A10, A11, A13, A17, A18, A22, A23, A32 и A33 развиваются новые методики обработки космофизических данных, которые применяются для анализа особых режимов динамики магнитосферы и области взаимодействия, которые не могут быть просчитаны имеющимися моделями. Полученные данные об аномальной динамике области взаимодействия используются для построения оригинальных эмпирических моделей магнитопаузы [A3, A4, A6, A21], возрастания потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите [A6], условий проникновения в магнитосферу солнечных космических лучей [A19] и плазмы магнитослоя [A26]. Верификация моделей на новых данных и уточнение на их основе динамики магнитосферы и переходной области проводятся в работах A8, A12, A14, A24, A25, A28 и A34.

Совместный научный анализ экспериментальных данных и подготовка к публикации полученных результатов составили не менее 50% личного вклада автора в работах А2(50%); А15(50%); А20(60%); А31(50%); А27(50%); А29(60%), причем вклад диссертанта в работах А20 и А29 был определяющим. Вклад диссертанта в работах А16 и А9 был не меньшим, чем других соавторов и составил 30% и 20%, соответственно. Работы А8, А12 и А16 были выполнены в рамках международных проектов INTAS и LWS, где диссертант был, соответственно, со-руководителем и основным исполнителем проекта. В работе А30 автор принимал участие в интерпретации результатов с личным вкладом 30%. Вся компьютерная обработка экспериментальных данных, их визуализация, анализ и сравнение с моделями проводились с использованием оригинального программного обеспечения, разработанного автором на языках FORTRAN и IDL.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из обзора литературы, введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, библиографии и 2-х приложений. Общий объем диссертации 349 страниц, из них 342 страницы текста, включая 109 рисунков и 25 таблиц. Библиография включает 323 наименования на 29 страницах. Приложения А и Б занимают 2 и 5 страниц соответственно.

Содержание работы

Обзор литературы посвящен основным работам, которые сыграли ключевую роль в нашем понимании структуры и динамики области взаимодействия дневной магнитосферы с солнечным ветром. Определяется морфология ее составных частей, физическая природа их формирования, а также ключевые параметры, контролирующие их геометрию и динамику. Приведены экспериментальные результаты, которые не вписывались в сложившуюся картину взаимодействия магнитосферы Земли с солнечным ветром. В обзоре литературы упомянуты работы, результаты которых были получены до 2000г.

Во Введении дается общее описание диссертационной работы, обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы. Аргументируется научная новизна исследований, обосновывается теоретическая и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Отмечается степень достоверности и апробация результатов. Приводится список публикаций, в которых были представлены основные результаты диссертации, и указан личный вклад автора.

В первой главе представлена методика диагностики среды в области взаимодействия и ее составных частей для их надежной идентификации по плазменным и магнитным данным, получаемым с различных КА. На большинстве КА мониторинг космической плазмы производится в диапазоне энергий от десятков эВ до десятков кэВ с временным разрешением в десятки секунд, в то время как магнитное поле измеряется с разрешением в секунды и доли секунды. Эти данные содержат информацию о нерадиальных компонентах скорости плазмы, концентрации гелия и температуре электронов в плазме солнечного ветра, что позволяет более точно определить основные физические параметры среды и баланса давлений в области взаимодействия. В результате, физические параметры среды определяются более полно с временным разрешением порядка минуты. Вводится полностью аберрированная геоцентрическая солнечно-магнитосферная система координат aGSM, которая учитывает скорость орбитального вращения Земли и нерадиальность скорости солнечного ветра. Представлена методика независимого определения временного сдвига для условий в межпланетной среде, наблюдаемых на большом удалении от Земли, основанная на использовании межпланетных плазменных и наземных магнитных данных.

Для комплексного анализа больших массивов экспериментальных данных высокого разрешения со спутниковых и наземных экспериментов и применения к ним различных моделей области взаимодействия был разработан пакет программ на базе объектного программного языка IDL, который предоставляет

широкий круг возможностей для визуализации научных данных, их всестороннего анализа и сравнения с ними модельных представлений.

Аномальные явления сопровождаются экстремальными изменениями размеров магнитосферы. В частности, во время экстремального сжатия под воздействием большой отрицательной компоненты V_z и очень высокого давления, вызванного приходом к Земле плотных фотосферных филаментов с большим содержанием гелия, магнитопауза и ГУВ могут оказаться внутри геостационарной орбиты, т.е. на геоцентрических расстояниях менее $6.6 R_3$. С другой стороны, при длительном радиальном ММП подсолнечная магнитопауза может наблюдаться на геоцентрических расстояниях более $14 R_3$, типичных для расположения ГУВ. В таких условиях надежное определение составных частей области взаимодействия и их пограничных областей, не зависящее от модели, должно опираться исключительно на характеристические параметры среды.

Межпланетная среда перед ГУВ определяется быстрым сверхмагнитозвуковым потоком солнечного ветра с доминирующей радиальной компонентой скорости, направленной вдоль оси Солнце-Земля. Потоки плазмы за ГУВ в дневном магнитослое являются дозвуковыми с большим вкладом нерадиальных компонент и сильными флуктуациями в плотности плазмы и магнитном поле. Таким образом, для идентификации этих сред требуется знать вектор скорости плазмы, альфеновскую скорость и звуковую скорость в плазме с учетом вклада температуры протонов и электронов. Область турбулентного форшока перед ГУВ определяется по сильным флуктуациям плазмы и магнитного поля, а также по присутствию энергичных ионов, ускоренных на квазипараллельной ГУВ.

Баланс давлений на магнитопаузе определяется полной плотностью энергии солнечного ветра, которая складывается из плотностей кинетической энергии протонов и ионов гелия, энергии магнитного поля и тепловой энергии, которая зависит от температуры как ионов, так и электронов. Полная плотность энергии в магнитосфере определяется главным образом энергией геомагнитного поля с небольшой добавкой энергии надтепловой плазмы в низкоширотной

пограничной области. Магнитосфера характеризуется регулярным магнитным полем с большой положительной компонентой V_z , а также популяцией энергичных частиц с очень низкой плотностью. Таким образом, для различия области магнитосферы от области магнитослоя предлагается две независимых методики: 1) по разности в ориентации и вариации магнитных полей, 2) по отношению плотности к температуре для электронов и ионов, которые в сотни раз выше в магнитослое, чем в магнитосфере.

Предлагаемый подход позволяет формализовать определение магнитопаузы и ГУВ как переходы, соответственно, магнитосфера – магнитослой и магнитослой – межпланетная среда. Более того, для статистического анализа и сравнения с эмпирическими моделями, в дополнение к моментам пересечения границ, предлагается использовать интервалы времени, когда КА находится в магнитосфере, магнитослое и в межпланетной среде в окрестности пересечений. Длительность интервалов составляет десятки минут и определяется в зависимости от задачи. Использование интервалов позволяет существенно увеличить статистику и, в дополнение к стандартной методике среднеквадратичного отклонения, применить такие статистические характеристики как вероятности правильного и ложного предсказаний, отношение переоценки к недооценке и т.п. Статистические характеристики позволяют более полно оценить точность моделей и выявить их систематические ошибки. Это обеспечивает надежность обнаружения аномальных явлений, которые, по определению, вызывают сильные отклонения от модельных значений.

Результаты первой главы опубликованы в работах A1, A3, A4, A5, A7, A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A25, A29. Общая цитируемость этих работ превышает 280.

Во второй главе исследуется геометрия и динамика магнитопаузы во время сильных магнитных бурь, когда дневная магнитосфера аномально сжимается, и магнитослой оказывается в районе геостационарной орбиты. В данных условиях наблюдаются такие аномальные явления как асимметрия утро-вечер, насыщение воздействия отрицательной V_z компоненты и образование

экваториального желоба. Для указанного выше исследования были идентифицированы геостационарные пересечения магнитопаузы (ГПМ) по магнитным данным с 3-х КА серии GOES и по плазменным данным с 5-и КА серии LANL. За период с 1995 по 2001гг. было обнаружено более 300 ГПМ, покрывающих практически все долготы. Общая статистика интервалов магнитослоя составила около 6000 точек с минутным разрешением, что позволило провести всесторонний анализ динамики и геометрии магнитопаузы.

Надежно доказан и формализован эффект насыщения воздействия V_z на магнитопаузу. А именно, при увеличении большой отрицательной V_z компоненты выше некоторого порога в районе -20 нТ минимальное давление солнечного ветра P_{\min} , необходимое для ГПМ, асимптотически приближается к некоторой константе и, т.о., магнитопауза перестает реагировать на воздействие V_z . Исследована численная зависимость эффекта насыщения от локального времени, широты и Dst индекса. Показано, что асимптотическое давление P_{\min} в вечернем секторе, более чем в два раза превышает P_{\min} в утреннем секторе, что хорошо согласуется с результатом по асимметрии, которая связана с асимметрией кольцевого тока. Также обнаружено, что с увеличением отрицательной Dst -вариации асимптотическое P_{\min} достигает наименьших величин. Кроме того, в условиях насыщения пропадает удвоение геомагнитного поля за магнитопаузой, которое образуется за счет вклада тока Чапмена-Ферраро на магнитопаузе. Это свидетельствует о существенном ослаблении геомагнитного поля, вследствие отрицательного магнитного эффекта тока хвоста, который усиливается и приближается к Земле во время магнитных бурь.

Статистический анализ распределения частоты ГПМ в зависимости от местного времени показал, что наиболее часто пересечения наблюдаются в интервале местного времени 10 - 11 LT на главной фазе магнитных бурь, когда V_z компонента отрицательная. В результате, частота ГПМ в предполуденном секторе существенно превышает частоту пересечений в послеполуденном секторе. Распределение становится симметричным относительно полудня при положительной V_z компоненте, т.е. когда экстремальная компрессия вызвана

исключительно действием динамического давления солнечного ветра. Также показано, что V_y компонента ММП никакого влияния на асимметрию не оказывает.

Анализ формы низкоширотной магнитопаузы проведен методом определения нормали к поверхности по магнитным данным для ГПМ. Обнаружено, что при большой отрицательной V_z компоненте носовая точка магнитосферы сдвинута от подсолнечной точки к вечеру. Данный факт вместе с результатами статистического анализа позволяет утверждать, что при отрицательной V_z компоненте ММП магнитосфера сдвинута к вечернему сектору на несколько радиусов Земли, так что ее утренний фланг оказывается ближе к Земле, чем вечерний. Этот результат был подтвержден в дальнейшем независимыми наблюдениями ГПМ во время сильных магнитных бурь. Рассмотрение возможных механизмов образования асимметрии позволило сделать вывод, что раздутие магнитосферы в вечернем секторе вызвано действием сильного асимметричного кольцевого тока, который развивается на главной фазе магнитных бурь в предполуночном и вечернем секторах. Дополнительный вклад может также давать эффект плазмосферных шлейфов, которые во время магнитных бурь поднимаются к геостационарной орбите в вечернем секторе, что приводит к ослаблению эрозии на магнитопаузе.

Исследование формы дневной магнитопаузы в условиях насыщения V_z при очень большом южном ММП во время сильных магнитных бурь обнаруживает ее сильное уплощение на низких широтах и образование экваториального желоба, вогнутости, в послеполуночном секторе. Такая геометрия может быть связана с отрицательным магнитным эффектом сильного тока хвоста в дневной магнитосфере в совокупности с тепловым давлением разрезного кольцевого тока CRC, максимумы которого находятся в полуночном секторе на широтах $\pm 20^\circ$.

С другой стороны, с ростом магнитуды отрицательной Dst-вариации порог насыщения быстро уменьшается от десятков до -20 нТ. Это может быть вызвано механизмом немагнитной природы, таким как усиление теплового давления ионов кольцевого тока, которые дают существенный вклад в баланс давлений на

магнитопаузе. Другим механизмом рассматривается заброс плазмы из плазмосферы в область взаимодействия полей противоположной направленности на магнитопаузе, что приводит к насыщению магнитного взаимодействия.

На основе полученных численных зависимостей минимального давления P_{\min} от локального времени, широты, ММП B_z и Dst была построена качественная модель ГПМ (Приложение А). Модель впервые учитывает эффект предистории через зависимость от геомагнитного индекса SYM-H, который отражает возмущенное состояние магнитосферы во время магнитных бурь. Сравнение этой модели с другими эмпирическими моделями показывает ее очень высокую точность: наименьший процент ошибок и хорошую сбалансированность отношения переоценки к недооценке расстояния до магнитопаузы. Применение качественной модели вместе с другими современными моделями позволило восстановить данные о плотности и составе солнечного ветра во время экстремальных магнитных бурь, когда плазменные детекторы работали некорректно при измерении очень быстрых и плотных потоков солнечного ветра, в особенности эруптивных фотосферных филаментов, и под воздействием интенсивных потоков солнечных космических лучей, которые оказывают негативное влияние на функционирование космических детекторов.

Результаты второй главы опубликованы в работах А3, А4, А9, А10, А11, А13, А14, А15, А21, А22, А24, А25, А28, А34. Общая цитируемость этих работ превышает 220.

В третьей главе представлен прикладной аспект полученных результатов, включая модели. Рассматривается влияние размеров и формы магнитопаузы на потоки релятивистских электронов на геостационарной орбите и на проникновение СКЛ в полярную шапку.

Потоки релятивистских электронов на геостационарной орбите были проанализированы с учетом новых представлений о геометрии и динамике магнитопаузы во время геомагнитных бурь. Уменьшение размеров дневной магнитосферы при взаимодействии с отрицательной B_z компонентой ММП приводит к приближению границы стабильного захвата заряженных частиц к

Земле и убеганию энергичных частиц из внешней области РПЗ через магнитопаузу. Построена эмпирическая модель возрастных потоков релятивистских электронов (>2 МэВ) на геостационарной орбите, которая в качестве параметров использует индексы геомагнитной активности K_p , PC и минимальный размер магнитопаузы на флангах R_f . Из модели вытекает, что потоки электронов хорошо коррелируют R_f : с уменьшением фланговых размеров магнитосферы во время магнитных бурь потоки электронов быстро падают на несколько порядков величины, что является прямым следствием убегания релятивистских частиц через магнитопаузу, особенно на утреннем секторе, через который электроны дрейфуют из ночной магнитосферы на дневную ее часть.

Проникновение СКЛ в область полярных шапок моделировалось по данным пяти низковысотных полярных спутников POES. Большое количество спутников позволило применить эллиптическую аппроксимацию границы проникновения протонов и электронов различных энергий на высоких широтах (Приложение Б). Эллиптическая граница учитывает асимметрию день – ночь, а также утро – вечер. Для частиц данной жесткости модель определяет инвариантную широту их проникновения в зависимости от магнитного местного времени MLT, индексов геомагнитной активности Dst и K_p , а также угла наклона геодиполя. Во время главной фазы магнитных бурь при больших K_p модель предсказывает уменьшение широты границы проникновения и ее сильную асимметрию со сдвигом к вечернему сектору в соответствии с эффектом асимметрии магнитопаузы. Показано, что учет асимметрии позволяет существенно улучшить точность определения границы проникновения СКЛ и их ионизационных эффектов в атмосфере и ионосфере на средних и высоких широтах. Независимое сравнение эллиптической модели с другими моделями для различных событий СКЛ показал ее очень высокую точность, которая в большинстве случаев превосходит остальные модели.

Результаты третьей главы опубликованы в работах A6, A18, A19, A30. Общая цитируемость этих работ превышает 60.

В четвертой главе подробно исследуются аномальные явления в магнитослое во время невозмущенных условий, такие как сильный дефицит плотности энергии при квазирадиальной ориентации ММП и сверхэнергичные плазменные струи. Объясняется физическая природа этих явлений и анализируется их геоэффективность. Исследования проводятся на основе данных с 5 высокоапогейных спутников миссии THEMIS, которые обеспечивают магнитные и плазменные измерения с разрешением порядка секунды одновременно в магнитослое, магнитосфере и/или в межпланетной среде.

Анализ межпланетных условий за 11 лет с 1998 по 2008 год показал, что непрерывные интервалы квазирадиальной ориентации ММП с конуглом $<30^\circ$ наблюдаются в течение $\sim 16\%$ времени. Во время длительных (>10 мин) интервалов квазирадиального ММП было обнаружено аномальное расширение магнитосферы до 20% , которое не описывается никакими существующими моделями. Это расширение вызвано существенным падением плотности энергии до 50% в магнитослое по сравнению с плотностью энергии солнечного ветра, так называемый режим магнитослоя с низкой плотностью (low pressure magnetosheath или LPM). Анализ спектра плазмы показал, что в данных условиях существенная доля плотности энергии (до 40% и более) сосредотачивается в области энергичных ионов с энергиями >10 кэВ. Эти ионы эффективно ускоряются в области мощного форшока, формирующегося в подсолнечной области при квазирадиальном ММП. Существенный вклад ионов, находящихся в высокоэнергичном хвосте спектра, приводит к недооценке давления плазмы в магнитослое, вычисляемого по ключевым термодинамическим параметрам. Энергичные ионы, убегающие из области ускорения, имеют достаточно большой ларморовский радиус и могут беспрепятственно проходить сквозь магнитопаузу. В результате они не дают вклада в баланс давлений на магнитопаузе, чем и объясняется глобальное расширение магнитосферы.

В магнитослое обнаружены быстрые потоки плотной плазмы, плотность энергии которых выше, чем плотность энергии солнечного ветра в межпланетной среде, так называемые сверхэнергичные плазменные струи в магнитослое

(СПСМ). Их длительность варьирует от нескольких секунд до нескольких минут. Многие СПСМ могут двигаться поперек общего потока плазмы магнитослоя и, в результате, способны взаимодействовать с магнитопаузой и быть геоэффективными.

Идентифицировано и проанализировано 554 геоэффективных крупномасштабных СПСМ с длительностью более 30 сек. Анализ межпланетных структур показал, что крупномасштабные СПСМ генерируются при взаимодействии межпланетных разрывов с ГУВ более чем в 2/3 случаев, оставшаяся часть генерируется в условиях квазирадialного ММП.

Показано, что крупномасштабные СПСМ могут двигаться поперек линий тока магнитослоя и эффективно взаимодействовать с магнитопаузой, что делает их геоэффективными. Обнаружено, что их взаимодействие с магнитопаузой вызывает локальные колебания в виде волнового цуга «расширение – сжатие – расширение», что связано с локальным перераспределением энергии плазмы. А именно, собственно тело СПСМ с очень высокой плотностью энергии окружено областью плазмы с пониженной плотностью энергии, что в сумме обеспечивает выполнение закона сохранения энергии-импульса.

Обнаружено, что около 60% геоэффективных СПСМ вызывают прямое проникновение плазмы магнитослоя в магнитосферу. Получено, что средний поток плазмы от СПСМ в дневную магнитосферу может достигать 10^{29} ионов в час, что сопоставимо с существующими оценками общего количества плазмы, поступающей в дневную магнитосферу. Анализ условий проникновения показал, что оно наилучшим образом контролируется такими физическими параметрами, как скорость плазмы в СПСМ (>220 км/с) и кинетическая $\beta_k > 1$. Здесь β_k - это отношение кинетической энергии плазмы джета к энергии геомагнитного поля в области взаимодействия. Это позволяет сделать вывод о комплексном механизме проникновения, который является комбинацией механизма конечного ларморовского радиуса с механизмом импульсного проникновения.

Геометрия взаимодействия СПСМ с магнитосферой определяется условиями их генерации на ГУВ. Показано, что 69% СПСМ генерируются

вследствие взаимодействия ГУВ с межпланетными разрывами, которые вызывают быструю перестройку форшока и его перемещение из одного сектора ГУВ в другой. В этом случае они имеют пространственную структуру, вытянутую вдоль области взаимодействия, что делает их наиболее геоэффективными. Остальные СПСМ имеют стохастическое происхождение в условиях подсолнечного форшока при квазирадиальном ММП. Будучи более локализованными, такие СПСМ имеют меньшие пространственные масштабы и, следовательно, меньшую геоэффективность.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах А20, А23, А26, А27, А29, А32. Общая цитируемость этих работ превышает 200.

В пятой главе анализируются геофизические эффекты влияния транзиентного форшока и крупномасштабных СПСМ на магнитосферу и ионосферу, в частности, магнитные вариации на поверхности Земли, высыпания энергичных частиц и дополнительная ионизация нижней ионосферы на высоких широтах, а также генерация резонансных пульсаций Pc1 типа жемчужин, наблюдаемых на поверхности Земли, и EMIC волн во внешней магнитосфере. Полученные результаты позволяют развить новое представление о процессах в цепи солнечный ветер - магнитослой – магнитосфера – ионосфера для спокойных межпланетных условий.

Поскольку геоэффективные крупномасштабные СПСМ окружены областями с пониженной плотностью энергии, это приводит к характерной локальной деформации магнитопаузы типа расширение – сжатие – расширение. Такие вариации магнитопаузы генерируют на поверхности Земли магнитные вариации в виде триполярного магнитного импульса «спад — пик — спад». В результате анализа данных наземных магнитометров на предмет наличия триполярного магнитного импульса было обнаружено, что такой импульс наблюдается на дневной стороне не всеми магнитными станциями. Это свидетельствует о том, что условия генерации СПСМ возникают лишь в определенном секторе ГУВ. При взаимодействии ГУВ с межпланетным разрывом, СПСМ генерируется в переходной области, где форшок коллапсирует.

Анализ временной динамики распространения магнитного сигнала от СПСМ в дневной полусфере позволяет заключить, что магнитное возмущение не обязательно распространяется от подсолнечной области к терминатору, но может следовать направлению от вечернего сектора к утреннему сектору или наоборот, в зависимости от наклона фронта межпланетного разрыва. Глобальная картина магнитных возмущений на дневной стороне позволяет оценить продольный масштаб крупномасштабной сверхэнергичной плазменной струи в магнитослое, который может достигать $10 R_E$. Такая большая пространственная протяженность крупномасштабных СПСМ делает их важным возмущающим фактором геомагнитной активности.

Показано, что взаимодействие СПСМ с магнитопаузой вызывает усиление высыпаний энергичных частиц из радиационных поясов Земли и плазменного слоя, что приводит к увеличению ионизации в верхней атмосфере и формированию спорадического Es слоя и интенсификации слоя F1 ионосферы на высоких широтах. Импульсы давления, которые вызывают высыпания энергичных частиц внутри магнитосферы, сопровождаются генерацией резонансных пульсаций Pc1 типа жемчужин на поверхности Земли и на геостационарной орбите в виде ЭМИЦ волн. Магнитные вариации наблюдаются в ограниченном долготном секторе, что свидетельствует о генетической связи геомагнитных пульсаций с динамикой форшока и генерацией СПСМ, которые локализованы в пространстве.

Результаты пятой главы опубликованы в работах A17, A23, A31, A33. Общая цитируемость этих работ превышает 75.

В Заключении перечислены основные результаты, полученные в ходе диссертационной работы, и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

В Приложении А представлен программный код качественной модели геосинхронных пересечений магнитопаузы.

В Приложении Б представлен программный код эллиптической модели границы проникновения протонов и электронов различных энергий в полярную шапку.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 34 печатных работах, которые опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности.

Публикации в журналах Web of Science/Scopus/RSCI:

A1. Дмитриев А.В., Орлов Ю.В., Персианцев И.Г., Суворова А.В. Трехмерная модель дневной магнитопаузы на основе искусственной нейронной сети // Геомагнетизм и Аэрномия – 1999. – Том. 39, № 5. – с. 8-15. Импакт-фактор РИНЦ (2023) 2.775. Личный вклад 80%. Объем 0.72 печатных листа.

Переводная версия:

Dmitriev A.V., Orlov Yu.V., Persiantsev I.G., Suvorova A.V. Three-dimensional model of the dayside magnetopause developed using the artificial neural network // Geomagnetism and Aeronomy – 1999. – Vol. 3995. – P. 544-551. Web of Science JCI2023=0.19. Личный вклад 80%. Объем 0.72 печатных листа.

A2. Suvorova, A., Dmitriev A., Kuznetsov S. Dayside magnetopause models // Radiation Measurements – 1999. – Vol. 30, no. 5. – P. 687-692. Web of Science JCI2023=0.88. Личный вклад 50%. Объем 1.44 печатных листа.

A3. Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Artificial neural network model of the dayside magnetopause: physical consequences // Physics and Chemistry of the Earth, Part C – 2000. – Vol. 25, no. 1-2. – P. 169-172. Web of Science JCI2023=0.84. Личный вклад 80%. Объем 0.48 печатных листа.

A4. Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Three-dimensional artificial neural network model of the dayside magnetopause // Journal of Geophysical Research – 2000. – Vol. 105. – P. 18,909-18,918. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 80%. Объем 1.2 печатных листа.

- A5. Dmitriev A.V., Chao J.-K., Yang Y.-H., Lin C.-H., Wu D.-J. Possible Sources of the Difference between a Model Prediction and Observations of Bow Shock Crossings // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* – 2002. – Vol. 13, no. 4. – P. 499-521. Web of Science JCI2023=0.3. Личный вклад 90%. Объем 2.76 печатных листа.
- A6. Dmitriev A.V., Chao J.-K. Dependence of geosynchronous relativistic electron enhancements on geomagnetic parameters // *Journal of Geophysical Research* – 2003. – Vol. 108, no. A11 – CiteID 1388SMP1. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 100%. Объем 1.44 печатных листа.
- A7. Dmitriev A., Chao J.-K., Wu D.-J. Comparative study of bow shock models using Wind and Geotail observations // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108, no. A12. – CiteID 1464SMP24. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 90%. Объем 2.28 печатных листа.
- A8. Dmitriev A., Belov A., Gorgutsa R., Ishkov V., Kozlov V., Nymmik R., Odintsov V., Petrukovich A., Popov G., Romashets E., Shevchenko M., Troshichev O., Tverskaya L., Zaitzev A. The Development of the Russian Space Weather Initiatives // *Advances in Space Research*. – 2003. – Vol. 31, no. 4. – P. 855-860. Web of Science JCI2023=0.76. Личный вклад 50%. Объем 0.72 печатных листа.
- A9. Yang Y.-H., Chao J.-K., Dmitriev A.V., Lin C.-H., and Ober D.M., Saturation of IMF Bz Influence on the Position of Dayside Magnetopause // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108, no. A3 – CiteID SMP3. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 20%. Объем 1.32 печатных листа.
- A10. Дмитриев А.В., Суворова А.В. Геосинхронные пересечения магнитопаузы 29–31 октября 2003 года // *Космические исследования*. – 2004. – Т. 42, № 6. – С. 574-584. Импакт-фактор РИНЦ (2023) 0.909. Личный вклад 80%. Объем 1.32 печатных листа.
- Переводная версия:
 Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Geosynchronous Magnetopause Crossings on October 29-31, 2003 // *Cosmic Research*. – 2004. – Vol. 42, no. 6. – P. 551-560. Web of Science JCI2023=0.17. Личный вклад 80%. Объем 1.2 печатных листа.

- A11. Dmitriev A. V., Suvorova A. V., Chao J. K., Yang Y.-H. Dawn-dusk asymmetry of geosynchronous magnetopause crossings // *Journal of Geophysical Research*. – 2004. – Vol. 109. – CiteID A05203. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 70%. Объем 1.44 печатных листа.
- A12. Dmitriev A., Crosby N., Chao J.-K. Interplanetary sources of space weather disturbances in 1997 to 2000 // *Space Weather*. – 2005. – Vol. 3, no. 3. – CiteID S03001. Web of Science JCI2023=0.9. Личный вклад 90%. Объем 1.92 печатных листа.
- A13. Dmitriev A., Chao J.-K., Thomsen M., Suvorova A. Geosynchronous magnetopause crossings on October 29-31, 2005 // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – V. 110, no. A8. – CiteID A08209. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 80%. Объем 1.68 печатных листа.
- A14. Dmitriev A., Chao J.-K., Suvorova A., Ackerson K., Ishisaka K., Kasaba Y., Kojima H., Matsumoto H. Indirect estimation of the solar wind conditions in 29-31 October 2003 // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. Vol. 110. – CiteID A09S02. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 70%. Объем 1.8 печатных листа.
- A15. Suvorova A. V., Dmitriev A. V., Chao J.-K., Thomsen M., Yang Y.-H. Necessary conditions for the geosynchronous magnetopause crossings // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110. – CiteID A01206. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 50%. Объем 2.04 печатных листа.
- A16. Karimabadi H., Sipes T.B., White H., Marinucci M., Dmitriev A., Chao J.-K., Driscoll J., and Balac N. Data mining in space physics: MineTool algorithm // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – Vol. 112. – CiteID A11215. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 30%. Объем 1.32 печатных листа.
- A17. Dmitriev A.V., Yeh H.-C. Geomagnetic signatures of sudden ionospheric disturbances during extreme solar radiation events // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2008. – Vol. 70, no. 15. – P. 1971-1984. Web of Science JCI2023=0.47. Личный вклад 100%. Объем 1.68 печатных листа.

- A18. Dmitriev A.V., Tsai L.-C., Yeh H.-C., and Chang C.-C. COSMIC/FORMOSAT-3 tomography of SEP ionization in the polar cap // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35. – CiteID L22108. Web of Science JCI2023=1.3. Личный вклад 80%. Объем 0.6 печатных листа.
- A19. Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., and L.-C. Tsai, Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006 // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – Vol. 115. – CiteID A12244 1-22. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 90%. Объем 2.64 печатных листа.
- A20. Suvorova A.V., Shue J.-H., Dmitriev A.V., Sibeck D., McFadden J., Hasegawa H., Ackerson K., Jelinek K., Safrankova J., Nemecek Z. Magnetopause expansions for quasi-radial interplanetary magnetic field: THEMIS and Geotail observations // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – Vol. 115. – CiteID A10216. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 60%. Объем 1.92 печатных листа.
- A21. Dmitriev A. V., Suvorova A. V., Chao J.-K., A predictive model of geosynchronous magnetopause crossings // *Journal of Geophysical Research*. – 2011. – Vol. 116. – CiteID A05208. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 90%. Объем 1.56 печатных листа.
- A22. Dmitriev A. V., Suvorova A. V. Equatorial trench at the magnetopause under saturation // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – Vol. 117. – CiteID A08226. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 95%. Объем 0.96 печатных листа.
- A23. Dmitriev, A. V., Suvorova A. V. Traveling magnetopause distortion related to a large-scale magnetosheath plasma jet: THEMIS and ground-based observations // *Journal of Geophysical Research*. – 2012. – Vol. 117. – CiteID A08217. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 95%. Объем 1.92 печатных листа.
- A24. Dmitriev A.V. and Suvorova A.V. The shape of strongly disturbed dayside magnetopause // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. – 2013. – Vol. 24, no. 2. – P. 225-232. Web of Science JCI2023=0.3. Личный вклад 90%. Объем 0.96 печатных листа.

- A25. Dmitriev A.V., Suvorova A. V., Chao J.-K., Wang C. B., Rastaetter L., Panasyuk M. I., Lazutin L. L., Kovtyukh A. S., Veselovsky I. S., Myagkova I. N. Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm // *Journal of Geophysical Research*. – 2014. – Vol. 119, no. 2. – P. 877-896. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 60%. Объем 2.4 печатных листа.
- A26. Dmitriev, A.V., Suvorova A.V. Large-scale jets in the magnetosheath and plasma penetration across the magnetopause: THEMIS observations // *Journal of Geophysical Research*. – 2015. – Vol. 120, no. 6. – P. 4423-4437. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 90%. Объем 1.8 печатных листа.
- A27. Suvorova, A.V., Dmitriev A.V. Magnetopause inflation under radial IMF: Comparison of models // *Earth and Space Science*. – 2015. – Vol. 2, no. 4. – P. 107-114. Web of Science JCI2023=0.71. Личный вклад 50%. Объем 0.96 печатных листа.
- A28. Dmitriev A.V., Lin R.L., Liu S.Q., and Suvorova A.V., Model prediction of geosynchronous magnetopause crossings // *Space Weather*. – 2016. – Vol. 14, no. 8. – P. 530–543. Web of Science JCI2023=0.9. Личный вклад 80%. Объем 1.68 печатных листа.
- A29. Suvorova A. V., Dmitriev A. V. On magnetopause inflation under radial IMF // *Advances in Space Research*. – 2016. – Vol. 58, no. 2. – P. 249-256. Web of Science JCI2023=0.76. Личный вклад 60%. Объем 0.96 печатных листа.
- A30. Лазутин Л.Л., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Деформация магнитосферы и граница проникновения солнечных протонов до начала главной фазы магнитной бури // *Геомагнетизм и Аэронаука*. – 2017. – Т. 57, № 2. – с. 137-148. Импакт-фактор РИНЦ (2023) 2.775. Личный вклад 30%. Объем 1.44 печатных листа.
- Переводная версия:
Lazutin L.L., Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Deformation of the magnetosphere and the penetration boundary of solar protons before the onset of the main phase of a magnetic storm // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2017. – Vol. 57, no. 2. –

P. 121-131. Web of Science JCI2023=0.19. Личный вклад 30%. Объем 1.32 печатных листа.

A31. Suvorova A. V., Dmitriev A. V., Parkhomov B. A., Tsegmed B. Quiet-time structured Pc1 waves generated during transient subsolar foreshock // *Journal of Geophysical Research*. – 2019. – Vol. 124, no. 11. – P. 9075-9093. Web of Science JCI2023=0.61. Личный вклад 50%. Объем 2.28 печатных листа.

A32. Dmitriev A.V., Lalchand B., Ghosh S. Mechanisms and Evolution of Geoeffective Large-Scale Plasma Jets in the Magnetosheath // *Universe*. – 2021. – Vol. 7, no. 5. – CiteID 152. Web of Science JCI2023=0.57. Личный вклад 95%. Объем 2.28 печатных листа.

A33. Dmitriev A. V., Suvorova A. V. Atmospheric Effects of Magnetosheath Jets // *Atmosphere*. – 2023. – Vol. 14, no. 1. – CiteID 45. Web of Science JCI2023=0.56. Личный вклад 90%. Объем 1.92 печатных листа.

A34. Дмитриев А.В. Геоостационарные пересечения магнитопаузы в феврале - апреле 2023 года // *Космические Исследования* – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 225-236. Импакт-фактор РИНЦ (2023) 0.909. Личный вклад 100%. Объем 1.44 печатных листа.

Переводная версия:

Dmitriev A.V. Geosynchronous Magnetopause Crossings in February-April 2023 // *Cosmic Research*. – 2024. – Vol. 62, no. 2. – P. 220-230. Web of Science JCI2023=0.17. Личный вклад 100%. Объем 1.32 печатных листа.

Список литературы

1. Гальперин Ю.И., Дмитриев А.В., Зеленый Л.М., Панасюк М.И. Влияние космической погоды на безопасность авиа и космических полетов // *Полет* – 2001. – Т. 3. – С. 27-39.
2. Кузнецов С.Н., Суворова А.В., Форма магнитопаузы вблизи геоостационарной орбиты // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1997. – Т. 37(3) – С. 1-11
3. Alexeev I.I., et al., Magnetic Storms and Magnetotail Currents // *J. Geophys. Res.* – 1996. – V. 101. – P. 7737.

4. Cowley, S.W.H. and Lockwood M., Excitation and decay of solar-wind driven flows in the magnetosphere-ionosphere system // *Annales Geophys.* – 1992 – V. 10 – P. 103-115
5. Fairfield D. H., et al. Upstream pressure variations associated with the bow shock and their effects on the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 78. – P. 3731–3744.
6. Gvishiani A., Lukianova R., Soloviev A., Khokhlov A. Survey of Geomagnetic Observations Made in the Northern Sector of Russia and New Methods for Analysing Them // *Surv. Geophys.* – 2014 – V. 35(5) – P. 1123-1154.
7. Haerendel G. and Paschmann G. Entry of Solar Wind Plasma into the Magnetosphere // Chapter in *Physics of the Hot Plasma in the Magnetosphere* – 1975 – P. 23-43, ISBN: 978-1-4613-4437-7.
8. Jorgensen A.M., et al. Boundary detection in three dimensions with application to the smile mission: The effect of photon noise // *Journal of Geophysical Research: Space Phys.* – 2019 – V. 124 – P. 4365-4383.
9. Lin Y., Swift D., and Lee L. Simulation of pressure pulses in the bow shock and magnetosheath driven by variations in interplanetary magnetic field direction // *J. Geophys. Res.* – 1996 – V. 101(A12) – P. 27,251-27,269.
10. Merka J., et al. Earth's bow shock and magnetopause in the case of a field-aligned upstream flow: Observation and model comparison // *J. Geophys. Res.* – 2003. – V. 108(A7) – P. 1269.
11. Mishin V.V. On the MHD instability of the Earth's magnetopause and its geophysical effects // *Planet. Space Sci.* – 1981. V. 29. P. 359–363
12. Mishin V.V. Accelerated Motions of the Magnetopause as a Trigger of the Kelvin-Helmholtz Instability // *J. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98(A12). – P. 21,365-21,371.
13. Mishin V.V. Velocity boundary layers in the distant geo-tail and the Kelvin-Helmholtz instability // *Planet. Space Sci.* – 2005. – V. 53. – P. 157–160.
14. Němeček Z., et al. Transient flux enhancements in the magnetosheath // *Geophys. Res. Lett.* – 1998 – V. 25(8). – P. 1273-1276.

15. Paul Cannon, FEng. Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure // Published by Royal Academy of Engineering, February 2013, ISBN 1-903496-95-0
16. Sibeck D.G., et al. Quantifying the global solar wind magnetosphere interaction with the Solar-Terrestrial Observer for the Response of the Magnetosphere (STORM) mission concept // *Front. Astron. Space Sci.* – 2023 – P. 10:1138616.
17. Spreiter J.R. and Alksne A.Y. Plasma flow around the magnetosphere // *Reviews of Geophysics* – 1969. – V. 7(1) – P. 11.
18. Spreiter J. R., Summers A. L., and Alksne A. Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* – 1966. – Vol. 14. – P. 223.
19. Tsyganenko N.A. Effects of the Solar Wind Conditions on the Global Magnetospheric Configurations as Deduced from Data-Based Field Models // *Proc. Third International Conference on Substorms (ICS-3)*, Versailles, France, 12-17 May 1996, ESA SP-389, October 1996
20. Yermolaev Y.I., et al., Peculiarities of the Heliospheric State and the Solar-Wind // *Magnetosphere Coupling in the Era of Weakened Solar Activity*, Universe – 2022. – V. 8 – P. 495.

Список сокращений и условных обозначений

ГПМ	-	Геостационарные пересечения магнитопаузы
ГРЭ	-	Релятивистские электроны на геостационарной орбите
ГУВ	-	Головная ударная волна
ИНС	-	Искусственные нейронные сети
КА	-	Космический аппарат
МГД	-	Магнитная гидродинамика
ММП	-	Межпланетное магнитное поле
ППШ	-	Поглощение в полярной шапке
РПЗ	-	Радиационные пояса Земли
СКЛ	-	Солнечные космические лучи
СКО	-	Среднеквадратичное отклонение
СПСМ	-	Сверхэнергичные плазменные струи в магнитослое
BSC		Модель ГУВ [Chao et al., 2002]
BSR		Модель ГУВ [Russell and Petrinec, 1996]
BSV		Модель ГУВ [Verigin et al., 2001]
Ch02	-	Модель магнитопаузы [Chao et al., 2002]
DS00	-	Модель магнитопаузы [A4]
KS98	-	Модель магнитопаузы [Kuznetsov and Suvorova, 1998a]
Li10		Модель магнитопаузы [Lin et al., 2010]
PM11		Модель магнитопаузы [A21]
PR96	-	Модель магнитопаузы [Petrinec and Russell, 1996]
R ₃	-	Радиус земли (6371 км)
Sh98	-	Модель магнитопаузы [Shue et al., 1998]