

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Дмитриева Алексея Владимировича
на тему
«Аномальные явления в области взаимодействия солнечного ветра
с дневной магнитосферой Земли на низких широтах»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Научная дисциплина солнечно-земных связей объединяет проблемы солнечной физики, физики плазмы и геофизики. На сегодняшний день сформировано четкое понимание природы взаимодействия солнечного ветра (СВ) с дневной магнитосферой и ее пограничных областей. Область взаимодействия на дневной стороне включает в себя магнитопаузу, магнитослой, головную ударную волну и область форшока. Разработан целый ряд эмпирических моделей для описания области взаимодействия, а также глобального магнитосферного магнитного поля и токов. Бурно развиваются комплексные глобальные модели магнитосферы и ее пограничных областей, объединяющие приближение магнитной гидродинамики (МГД) с эмпирическими моделями.

Развитие современных экспериментальных методов исследования околоземного и межпланетного космического пространства позволило накопить огромный объем новых данных и получить новые экспериментальные факты о взаимодействии магнитосферы Земли с солнечным ветром как в невозмущенных условиях, так и во время сильных магнитных бурь. При сравнении новых экспериментальных данных с

моделями были обнаружены существенные расхождения. Отчасти это было связано с ограниченным динамическим диапазоном и низким временным разрешением экспериментальных данных, использованных для построения моделей. Кроме того, это указывало на проявление феноменов, или аномалий, которые не вписывались в существовавшие ранее представления.

Особенно серьезные расхождения моделей с экспериментом наблюдаются во время сильных магнитных бурь, которые случаются редко, вследствие чего экспериментальная информация о них ограничена. Сильные магнитные бури генерируются сильными возмущениями в плазме солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), когда параметры межпланетной среды могут достигать экстремальных значений. В таких условиях достоверное определение условий в межпланетном пространстве и реакции на них магнитосферы являются непростой задачей для космических экспериментов, для решения которой требуется комплексный анализ космофизических и наземных данных.

Интересным является факт обнаружения современными космическими миссиями Geotail, Interball, Cluster возмущений в магнитосфере и в области взаимодействия при спокойном солнечном ветре. Эти явления были приписаны влиянию изменения ориентации ММП на глобальную магнитосферную конвекцию, а также возмущающему воздействию турбулентной области форшока перед головной ударной волной. Детальное исследование магнитосферных возмущений в спокойных условиях потребовало новой экспериментальной методики зондирования области взаимодействия несколькими космическими аппаратами для одновременного наблюдения условий в магнитосфере, магнитослое и области форшока. Такая методика была реализована в космической миссии THEMIS, которая состоит из 5 спутников, находящихся друг от друга на расстоянии в тысячи км. В

результате были получены новые данные, позволившие обнаружить новые явления и решить ранее нерешенные задачи.

Диссертационная работа А. В. Дмитриева содержит решение нескольких актуальных задач в области солнечно-земных связей, которые имеют большое значение для развития физики космоса, а также для практического применения для безопасного функционирования космических миссий.

Основные результаты заключаются в обнаружении и объяснении новых режимов энергетического баланса в области взаимодействия солнечного ветра (СВ) с дневной магнитосферой, которые определяются ориентацией ММП. Для этого был проведен анализ данных наблюдений нескольких КА в межпланетной среде, в магнитослое и в магнитосфере и ионосфере Земли, а также наземных геомагнитных данных за два последних солнечных цикла. Для обработки и интерпретации собранных разнородных данных автором была разработана оригинальная компьютерная методика их комплексного анализа, которая позволяет провести верификацию их достоверности, вычисление ключевых физических параметров космической среды, определение структуры области взаимодействия СВ с магнитосферой, идентификацию в ней пограничных слоев и сравнение полученных результатов с существующими моделями.

Для сильного южного ММП в работе впервые проведен детальный анализ динамики и геометрии границы магнитосферы в области геостационарной орбиты, что наблюдается довольно редко. В этих экстремальных условиях автору удалось обнаружить такие аномальные явления, как асимметрия магнитосферы утро-вечер и насыщение воздействия

отрицательной V_z компоненты ММП на магнитопаузу. Впервые обнаружена сильная зависимость этих эффектов от текущего уровня магнитной бури. Показано, что асимметрия утро-вечер магнитосферы, а именно ее расширение в послеполуденном и вечернем секторах вызвана развитием сильного асимметричного кольцевого тока с максимумом в послеполуденном секторе на главной фазе магнитных бурь. Обнаруженные эффекты могут быть объяснены комплексным вкладом магнитного эффекта сильного тока хвоста и теплового давления кольцевого тока в баланс давлений на границе дневной магнитосферы аномально малых размеров.

Полученные результаты позволили автору разработать новые модели внешней магнитосферы во время геомагнитных бурь: модель магнитопаузы на геостационарной орбите, модель возрастных релятивистских электронов на геостационарной орбите и модель проникновения солнечных космических лучей в полярные шапки. Сравнение с результатами независимых исследований показало, что эти модели демонстрируют наилучшую точность, что еще раз доказывает важный вклад обнаруженных эффектов в динамику магнитосферы во время магнитных бурь.

Автору при проведении анализа возмущений в области взаимодействия СВ с магнитосферой при спокойных условиях в СВ удалось обнаружить и исследовать такие слабо изученные явления, как: 1) существование сверхэнергичных плазменных струй в магнитослое с плотностью энергии более высокой по сравнению с СВ и 2) аномальное глобальное расширение магнитосферы при радиальном ММП. Было показано, что существенное падение плотности энергии надтепловой плазмы в магнитослое вызывает расширение магнитосферы. При этом недостаток энергии автор объясняет кинетическим эффектом ускорения энергичных ионов до энергий > 10 кэВ в подсолнечном области форшока. Эти энергичные ионы уносят более 40%

плотности энергии СВ из магнитослоя, не участвуют во взаимодействии с магнитопаузой, тем самым уменьшают полное давление в магнитослое, нарушая условие равновесия магнитопаузы и поэтому вызывают ее расширение. Показано, что в этих условиях в магнитослое образуются сверхэнергичные плазменные струи.

Диссертант показал, что основная масса крупномасштабных плазменных струй генерируется главным образом при взаимодействии головной ударной волны с межпланетными разрывами, т.е. при резкой смене направления вектора ММП. Наблюдаемые в это время энергичные струи имеют поперечный и продольный пространственные масштабы $1 R_3$ и $10 R_3$, соответственно. Они окружены областью с пониженной плотностью энергии в магнитослое, что приводит к характерной локальной деформации магнитопаузы типа расширение – сжатие – расширение. Такая структура обеспечивает сохранение полной энергии магнитослоя в масштабах струи.

В работе показано, что при взаимодействии плазменных струй с магнитопаузой происходит прямое проникновение плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы. Статистический анализ позволил определить условия такого проникновения, которые состоят в сочетании двух механизмов: импульсного проникновения плазмоида через магнитный барьер и конечным ларморовским радиусом ионов плазмоида в магнитной ловушке.

Проведен всесторонний анализ эффектов воздействия плазменных струй на дневную магнитопаузу и их проявлений в ионосфере. Было показано, что эти струи вызывают высыпание энергичных частиц, локальную генерацию электромагнитных ионно-циклотронных волн во внешней магнитосфере и генерацию пульсаций Pc1 типа жемчужин, наблюдаемых на

поверхности Земли, повышение ионизации верхней атмосферы и интенсификацию спорадического слоя Es ионосферы на высоких широтах.

Полученные в работе результаты позволяют развить новое представление о процессах в цепи солнечный ветер - магнитослой – магнитосфера – ионосфера при различных уровнях геомагнитной активности. Это открывает перспективы дальнейших исследований, которые будут основаны на усовершенствованной экспериментальной технике и расширенном охвате наблюдений. Планируемые в ближайшее время миссии, такие как SMILE и STORM, позволят проводить одновременно наблюдения межпланетной среды в непосредственной близости от Земли и дистанционное зондирование глобальной структуры магнитосферы, в том числе и области взаимодействия на дневной стороне. Это позволит проверить и скорректировать существующие знания о динамике магнитосферы и улучшить наше понимание картины взаимодействия СВ с магнитосферой.

Представленные в диссертации результаты являются достаточным обоснованием положений, выдвинутых на защиту, выводов и рекомендаций, направленных на реализацию программы дальнейших исследований в области солнечно-земной физики.

Следует отметить высокую достоверность полученных в диссертации результатов, обусловленную использованием апробированных методов анализа экспериментальных данных, полным учетом возможных факторов, влияющих на интерпретацию результатов в соответствие с существующими модельными представлениями, и сопоставлением новых результатов и построенных на основе них моделей с достижениями, опубликованными в научной литературе. Полученные результаты соответствуют передовому уровню мировых достижений в данной области науки.

В диссертации такого объема и охвата материала неизбежны недостатки.

Если в работе последовательно прослеживается роль вертикальной и радиальной компонент ММП во взаимодействии СВ с магнитосферой Земли, то при рассмотрении асимметрии магнитосферы утро-вечер не обсуждается роль азимутальной компоненты ММП. Последняя, однако, при обычной спиральной геометрии вызывает минимум магнитного давления в утреннем секторе в магнитослое и соответственно лучшие условия раскачки там неустойчивости и турбулизации сдвигового течения.

Также недостаточно освещена возможная роль неустойчивости Релея-Тэйлора в раскачке неустойчивости границы в целом и, в частности, в механизме импульсного проникновения плазмы магнитослоя в магнитосферу.

Относительно оформления рисунков. Некоторые из них очень трудно читать, как например рис. 3.2.18. Рис. 5.2.3 очень мелок, что затрудняет интерпретацию расчетов по распространению взаимодействия головной ударной волны с межпланетным разрывом. Не очень разборчив и Рис. 5.2.7, который важен для понимания распространения взаимодействия плазменной струи с дневной магнитопаузой.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости результатов диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5

Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Дмитриев Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник (ученое звание), ведущий научный сотрудник отдела физики атмосферы и околоземного космического пространства Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук»

Мишин Владимир Виленович

13.03.2025

Контактные данные:

тел.: 7(395)2564534, e-mail: vladm@iszf.irk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Адрес места работы:

664033 а/я 291, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126а,

Институт солнечно-земной физики Сибирского Отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), отдел физики атмосферы и околоземного космического пространства

Тел.: рабочий телефон; e-mail: адрес официальной почты

Подпись сотрудника ИСЗФ СО РАН Мишина В. В. удостоверяю:

Ученый секретарь

И. И. Салахутдинова