

## **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**

Диссертационная работа Дмитриева Алексея Владимировича посвящена проблеме солнечно-земных связей, а именно, исследованию взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитосферой Земли.

**Актуальность выбранной темы** обусловлена важностью изучения процессов на границе магнитосферы Земли как для понимания физики солнечно-земных связей, так и для решения прикладных задач, связанных с обеспечением безопасности функционирования околоземных космических аппаратов.

За последние десятилетия в этой области было запущено несколько космических экспериментов и развернуты обширные наземные сети по мониторингу околоземного космического пространства. В результате получен огромный массив современных экспериментальных данных, который требует развития новых подходов для их обработки и анализа. Одной из задач в этом направлении является верификация существующих модельных представлений и разработка новых моделей с учетом тех эффектов, которые были плохо изучены ранее. Первая глава диссертации посвящена разработке усовершенствованной методики диагностики среды в области взаимодействия дневной магнитосферы с солнечным ветром и ее составных частей для их надежной идентификации по плазменным и магнитным данным, получаемым с различных космических аппаратов.

Во второй главе исследуется геометрия и динамика магнитопаузы во время сильных магнитных бурь, когда дневная магнитосфера аномально сжимается, так что геостационарные спутники оказываются в магнитослое. В данных условиях обнаружены такие аномальные эффекты, как насыщение воздействия межпланетного магнитного поля южной направленности, асимметрия утро-вечер и образование экваториального желоба на магнитопаузе. На основе численного описания обнаруженных эффектов была построена оригинальная модель магнитопаузы, позволяющая определить давление солнечного ветра, необходимое для пересечения магнитопаузой геостационарной орбиты в данной точке, для данного уровня геомагнитной активности и данного значения  $Vz$  компоненты межпланетного магнитного поля.

Прикладные аспекты результатов, полученных для возмущенной магнитосферы, представлены в третьей главе. Показано, что учет размеров и формы магнитопаузы позволяет улучшить точность моделирования возрастных потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите, что является важной задачей для обеспечения безопасного функционирования геостационарных космических аппаратов. Модель проникновения солнечных космических лучей в полярную шапку, построенная с учетом эффекта асимметрии утро-вечер, позволяет существенно увеличить точность определения широты обрезания энергичных частиц во время магнитных бурь, что необходимо учитывать для определения состояния ионосферы и возмущений в распространении радиоволн на высоких и средних широтах.

Аномальные явления в магнитослое во время невозмущенных условий исследуются в четвертой главе. Обнаружено сильное расширение всей магнитосферы при квазирадиальной ориентации ММП, которое играет важное значение при заполнении радиационных поясов Земли энергичными заряженными частицами. Всестороннее исследование сверхэнергичных плазменных струй в магнитослое позволило обнаружить, что они являются

важным источником геомагнитных пульсаций и горячей плазмы во внешней области дневной магнитосферы.

Геофизические эффекты сверхэнергичных плазменных струй исследуются в пятой главе. Показано, что воздействие крупномасштабных плазменных струй на магнитопаузу вызывает высыпания энергичных частиц из радиационных поясов и дополнительную ионизацию нижней ионосферы на высоких широтах, а также генерацию низкочастотных резонансных пульсаций типа жемчужин, наблюдаемых на поверхности Земли, и электромагнитных ионно-циклотронных волн во внешней магнитосфере. Таким образом, полученные результаты позволяют развить новое представление о процессах в цепи солнечный ветер - магнитослой - магнитосфера - ионосфера для спокойных межпланетных условий.

Представленные в диссертации результаты являются одним из предметов верификации и более глубокого анализа для будущих космических миссий, основанных на передовых технологиях дистанционного зондирования околоземного космического пространства. Это позволит решить одну из важнейших задач в исследовании солнечно-земных связей, состоящей в получении одновременно локальных характеристик межпланетной среды и соответствующей им глобальной картины магнитосферы.

Каждую главу предваряет основательный обзор предыдущих работ на соответствующую тему, что крайне удобно для восприятия глав как самостоятельных разделов диссертации.

**Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

На защиту вынесено 8 положений, отражающих главные цели и задачи исследования, направленные на экспериментальное исследование пространственно-временной структуры области взаимодействия магнитосферы Земли с солнечным ветром на пространственных масштабах в

несколько земных радиусов и временных масштабах от десятков секунд до нескольких часов.

Для решения этих задач была разработана оригинальная методика анализа больших массивов разнородных экспериментальных наблюдений динамики космической плазмы и магнитных полей, полученных как в космических экспериментах, так и с наземных пунктов наблюдений. Это позволило провести всесторонний анализ малоисследованных ранее явлений в магнитосфере Земли как во время магнитных бурь, так и при невозмущенных условиях.

В диссертации проведен детальный анализ данных о пересечениях магнитопаузы геостационарными спутниками во время геомагнитных бурь, на основе которого была показана сильная асимметрия дневной магнитосферы и насыщение воздействия южного межпланетного магнитного поля на размеры магнитопаузы. Полученные результаты позволили разработать более точные модели магнитопаузы, возрастных релятивистских электронов на геостационарной орбите, а также границ проникновения солнечных космических лучей в полярную шапку во время геомагнитных бурь.

Для обоснования выводов и положений, относящихся к невозмущенным условиям, был проведен всесторонний анализ экспериментальных данных, полученных в современных высокоапогейных космических миссиях. Это позволило обнаружить аномальное глобальное расширение магнитопаузы при квазирадиальном межпланетном магнитном поле, что вызвано существенным падением плотности энергии надтепловой плазмы в магнитослое, вследствие эффективного ускорения ионов солнечного ветра в подсолнечном форшоке и их «убегания» из области взаимодействия. Проведено детальное исследование феномена сверхэнергичных плазменных струй в магнитослое, плотность энергии которых выше, чем плотность энергии набегающего солнечного ветра. Определены их пространственные масштабы, проанализированы условия

генерации и обнаружен целый ряд геофизических эффектов, вызываемых взаимодействием струй с магнитопаузой.

Всё это является достаточным обоснованием положений, выдвинутых на защиту, выводов и рекомендаций, направленных на реализацию программы дальнейших исследований в этой области науки.

### **Достоверность научных результатов**

Степень достоверности полученных результатов определяется высокой информативностью космофизических данных, полученных из различных космических и наземных экспериментов, что позволяет 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.

### **Новизна научных результатов**

Новыми результатами являются разработанный метод исследования пространственно-временной структуры области взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитосферой, обнаружение в этой области новых режимов энергетического баланса и их геофизические эффекты.

В частности, во время магнитных бурь было получено статистически значимое доказательство расширения магнитосферы в послеполуденном секторе. Доказано насыщение воздействия межпланетного магнитного поля южной направленности на положение дневной магнитопаузы и впервые обнаружена сильная зависимость этого эффекта от текущего уровня геомагнитной возмущенности. На основе обнаруженных эффектов разработаны новые модели внешней магнитосферы во время геомагнитных бурь.

При невозмущенных условиях для квазирадиальной ориентации межпланетного магнитного поля впервые показано и объяснено аномальное уменьшение плотности энергии в магнитослое, что приводит к глобальному расширению магнитосферы. На основе всестороннего анализа большой статистики крупномасштабных сверхэнергичных плазменных струй в магнитослое обнаружено, что они генерируются главным образом при взаимодействии головной ударной волны с межпланетными разрывами. Впервые экспериментально доказано, что взаимодействие плазменных струй с магнитопаузой вызывает сильную локальную компрессию и прямое проникновение плазмы магнитослоя в магнитосферу. С учетом того, что моделирование плазменных струй в полной мере пока что невозможно, полученные результаты вносят важный вклад в понимание их природы.

В заключении работы хорошо описаны дальнейшие планы и перспективы исследований, которые будут основаны на усовершенствованной экспериментальной технике и расширенном охвате наблюдений. Будущие космические миссии разрабатываются для проведения наблюдений межпланетной среды в непосредственной близости от Земли с одновременным дистанционным зондированием глобальной структуры магнитосферы, в том числе и области взаимодействия на дневной стороне. Это позволит проверить и скорректировать существующие знания о динамике магнитосферы во время магнитных бурь и улучшить наше понимание воздействия солнечного ветра на магнитосферу.

К несомненным достоинствам работы следует отнести то, что проведенное исследование носит масштабный характер, поскольку охватывает обширные области магнитосферы и описывает существенные для межпланетной среды процессы. Это является довольно редким явлением среди современных научных работ в области космофизики, большая часть которых посвящена изучению частных явлений.

Работа представляет собой законченное комплексное исследование, которое включает отбор исходных данных наблюдений, их обработку, разработку теоретических положений, приложения и интерпретацию полученных результатов.

Впечатляет огромный объем исходных сырых данных, представляющих собой разнородные спутниковые и наземные наблюдения, которые были задействованы в исследовании. Для их предварительной обработки активно использовались и были развиты актуальные методы анализа данных. В современной геофизике это является необходимым блоком любых исследований, обеспечивающим получение значимого результата – эпоха сугубо теоретических изысканий без привлечения экспериментальных данных осталась в прошлом.

Работа полностью соответствует диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, поскольку полученные результаты можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области обнаружения и объяснения новых режимов энергетического баланса в области взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитосферой и их геофизических эффектов. Это вносит существенный вклад во всестороннее изучение аномальных явлений в области взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитосферой Земли на низких широтах. Значимость результатов подтверждается колоссальным объемом научных работ (34 статьи), опубликованных в престижных международных научных журналах, включая статьи в журналах 1-го и 2-го квартилей Web of Science и Scopus.

### **Замечания**

По опыту оппонента количество положений, выносимых на защиту докторской диссертации, обычно не превышает 4-5. У соискателя их 8.

В работе нет упоминания современной спутниковой миссии Magnetospheric Multiscale Mission (MMS), предоставляющей также ценные данные об исследуемых в диссертации процессах.

В диссертации не обсуждается, может ли южно-атлантическая крупномасштабная аномалия главного магнитного поля привносить систематическую погрешность при оценке несимметричности формы магнитопаузы и других обсуждаемых в диссертации геометрических особенностей магнитосферы.

В Главе 2 недостаточно обоснован предложенный физический механизм формирования желоба в экваториальной области магнитопаузы во время сильных магнитных бурь.

В Главе 5 при обсуждении плазменных струй (СПСМ) исследуются их приземные электромагнитные эффекты, фиксируемые магнитными станциями и обсерваториями. Однако недостаточно убедительно описан алгоритм распознавания в минутных данных наблюдений сигналов, ассоциированных именно с плазменными струями. В особенности это касается приэкваториальных и высокоширотных обсерваторий, в данных которых содержится целая гамма сигналов разных источников, включая экваториальный и авроральные электроджеты, соответственно. Также известно, что практически все процессы, происходящие на границе магнитопаузы, проецируются на высокие широты в обоих полушариях. Кроме того, искомый эффект исследуется лишь по одному событию СПСМ, что представляется недостаточным для уверенной статистики.

Не хватает информации о том, каково прикладное значение изучения плазменных струй. Например, к каким негативным последствиям для спутниковой и наземной высокотехнологичной инфраструктуры они могут приводить.

В ряде случаев отсутствует красная строка после нумерации формул (см., например, стр. 27-28).



В диссертации встречаются терминологические неточности, например, «напряженность магнитного поля в нТл», что может вызывать недопонимание в интерпретации изложенных результатов.

Качество рисунков в ряде случаев оставляет желать лучшего (например, Рис. 3.2.1, 3.2.3, 3.2.18 и др.).

В подписях к рисункам, взятым из Интернета, не указаны ссылки на соответствующие ресурсы. Так, например, карты, представленные на Рис. 5.2.7, были взяты с сайта SuperMAG. То же касается Рис. 5.2.4, 5.2.5 (ресурс OmniWEB) и др.

На некоторых рисунках присутствуют и русскоязычные и англоязычные обозначения (например, Рис. 1.3.4, 5.2.6 и др.).

Некоторые фразы составлены некорректно, например, на стр. 44 «... быстрое магнитозвуковое число Маха ...» и др.

Некоторые физические параметры (например, Dst) где-то обозначены курсивом, а где-то нет (см., например, стр. 82).

В тексте есть опечатки, например, «Гельмгольца» на стр. 7, «варьирует» на стр. 44, «краницы» на стр. 176 и др.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости 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, член-корреспондент РАН, директор  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Геофизического центра Российской академии наук

СОЛОВЬЕВ Анатолий Александрович

10 марта 2025 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495)9300546, e-mail: a.soloviev@gcras.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных  
ископаемых»

Адрес места работы:

119296, г. Москва, ул. Молодёжная, д. 3,  
Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН),  
административно-управленческий аппарат  
Тел.: 7(495)9300546; e-mail: gcras@gcras.ru

Подпись сотрудника

ГЦ РАН А. А. Соловьева удостоверяю:  
главный специалист по кадрам ГЦ РАН

В. П. Дасаева  
10 марта 2025 г.