

ОТЗЫВ

официального оппонента профессора Сергеева Виктора Андреевича
на диссертацию Малыхина Андрея Юрьевича
«Плазменные явления сопровождающие процесс диполизации магнитного
поля в хвосте магнитосферы Земли»

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Актуальность темы диссертации связана с тем, что на функционирование важных спутниковых систем разного назначения оказывают существенное влияние изменения характеристик энергичной плазмы в магнитосфере Земли, вызванные магнитосферными взрывными процессами. Одним из важнейших их проявлений является инжекция плазмы с сопутствующей диполизацией (усилением магнитного поля) в процессе которых ускоряются и переносятся во внутреннюю магнитосферу значительные потоки энергичных частиц, пополняющих радиационный пояс. Многие важные детали этого процесса еще неясны, поэтому целенаправленное экспериментальное исследование поведения сверхтепловых и энергичных частиц плазменного слоя и их ускорения в периоды продолжительных диполизаций, осуществленное в диссертации по данным современных многоспутниковых проектов Cluster и MMS, является весьма актуальным.

Целями диссертационной работы заявлены: - определение пространственно-временных масштабов магнитных и токовых структур и возможных механизмов, ответственных за возрастания потоков сверхтепловых электронов и ионов разных масс в периоды продолжительных диполизаций, а также определение энергетических и угловых характеристик резонансных электронов, взаимодействующих со свистовыми волнами во время продолжительных диполизаций (ПД) в ближнем геомагнитном хвосте

В ряду **новых результатов** отметим следующие.

- В работе впервые выделены значительные магнитные градиенты и интенсивные токовые структуры на субионных и электронных масштабах, связываемые авторами с широко известными фронтами диполизации (ДФ), и подтверждена основная роль электронов, как носителей тока в этих структурах.
- получены экспериментальные данные о среднем поведении потоков и спектральных индексов энергичных электронов и ионов разных масс и о корреляционной связи этих потоков с вариациями магнитного поля в периоды ПД на входе во внутреннюю магнитосферу;
- впервые определены энергетические и питч-угловые характеристики электронов резонансно взаимодействующих с квазипараллельными свистовыми волнами в магнитосферном плазменном слое и экспериментально продемонстрировано, что в периоды ПД энергия может передаваться от менее энергичных электронов к более энергичным посредством взаимодействия со свистовыми волнами.

Достоверность полученных результатов и выводов обусловлена применением современных методов интерпретации данных спутниковых систем, сочетанием подробного изучения отдельных событий со статистическими исследованиями. Результаты обсуждались на 8 международных и российских конференциях и опубликованы в 8 ведущих журналах.

Ценность для науки и практики. Ускорение частиц в периоды продолжительных диполизаций на входе во внутреннюю магнитосферу является важным элементом процесса высвобождения энергии в хвосте магнитосферы. Статистические данные о поведении потоков и спектральных индексов и их корреляции с магнитными вариациями важны для развития и валидации физических моделей генерации энергичных частиц поступающих во внешний радиационный пояс. Знание временных масштабов ускорения и характерных энергий, до которых могут быть ускорены ионы разных масс и электроны во время диполизаций, даёт информацию о том, на каких энергиях можно ожидать возрастание соответствующих потоков вблизи геостационарной орбиты. Полученные сведения об энергетических и питч-угловых характеристиках резонансных электронов показывают какая часть электронной популяции потенциально может быть рассеяна в конус потерь квазипараллельными свистовыми волнами, формируя высыпания электронов в авральной зоне.

Диссертация объемом 169 страниц текста (включая 42 рисунка и 12 таблиц) состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 146 наименований.

Введение содержит необходимые сведения о диссертационной работе, включая актуальность темы, цели работы, ее научная новизну, научную и практическую значимость результатов. Здесь же приведены основные положения выносимые на защиту, освещены апробация работы, личный вклад автора и публикации по теме.

Первая глава носит обзорный характер, содержит представления о структуре магнитосферы и подробный обзор прежних результатов о возмущениях и механизмах ускорения в ночной магнитосфере, и заключается описанием использованных в работе приборов проекта MMS.

В начале второй главы представлены наблюдения системы Cluster в 2013г при уникально малых разносах спутников соизмеримых с электронной инерционной длиной. Впервые показаны и проанализированы кратковременные (субсекундные) события наблюдения больших градиентов B на электронном масштабе; отмечена их связь с фазой роста диполизации, приведена небольшая статистика. В параграфе 2.2 подробно изучены несколько случаев субионных структур наблюдаемых системой MMS в серии фронтов диполизации, проанализированы их плазменные и геометрические характеристики, подтверждено что электроны являются основными носителями тока.

Опираясь на измерения спутников Cluster и THEMIS P3, глава 3 диссертации рассматривает процессы ускорения протонов и тяжелых ионов во время диполизации. Наряду с подробным анализом потоков и спектров в отдельном событии, методом наложенных эпох получены средние характеристики потоков и спектральных индексов. Наряду со средним поведением в периоды ПД рассмотрены импульсные возрастания ионного потока следующие за импульсами B_z , выделены и обсуждены различия поведения потока на разных энергиях и для разных масс ионов, на качественном уровне обсуждены их возможные причины.

В четвертой главе на том же материале изучается поведение спектров сверхтепловых электронов во время диполизаций, включая детальный анализ события и статистику изменений потоков и спектров в 13 событиях продолжительной диполизации. Хорошая корреляция ($CC > 0.6$) наблюдается между вариациями потока электронов и магнитной компонентой BZ вплоть до энергий порядка 90 кэВ, как ожидается при действии бетатронного и Ферми ускорения. Нарушение этой закономерности для больших энергий связывается автором с иными (возможно неадиабатическими) механизмами ускорения.

В пятой главе диссертации в периоды продолжительных диполизаций, совместно со спектрами продольных свистовых волн подробно изучается динамика функции распределения по энергии и питч-углам электронов в диапазоне энергий 0.6-30 кэВ. Выполненная по уникальным по детальности измерениям спутников MMS и в наибольшей степени опирающаяся на теорию, эта глава наглядно показывает высокий уровень владения автором материалом и современными методами экспериментальных исследований. Сопоставление частотной зависимости получаемого инкремента со спектральной интенсивностью свистовых волн показало хорошее соответствие между ними, позволяя определить диапазоны энергий электронов дающих положительный и отрицательный вклад в изменение энергии волны, и определить питч-угловые и энергетические характеристики резонансных электронов.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В целом, диссертация представляет большую, интересную и полезную работу, она содержит новые результаты о структуре возмущений и закономерностях поведения потоков энергичных частиц в периоды продолжительных диполизаций, когда ускоряемые частицы переносятся во внутреннюю магнитосферу и пополняют радиационные пояса и кольцевой ток. Работа выполнена на современном уровне, использует современные многоспутниковые системы и соответствующие методы анализа их данных, демонстрирует знакомство с проблематикой и высокую квалификацию автора.

Несмотря на отмеченные достоинства работы по тексту диссертации можно сделать ряд замечаний:

(1) Демонстрация интенсивных токовых структур субсекундного временного и электронного пространственного масштабов безусловно представляет новый интересный результат, однако в их исследовании сделаны лишь первые шаги. Пока остаются за кадром их проявление в спектре мощности магнитных вариаций, неясно принадлежат ли они к классу квазистационарных или волновых (и какого типа) структур, в силу геометрических различий эксперимента не очевидна идентичность структур, изучавшихся по данным Cluster и MMS в разделах 2.1 и 2.2. Здесь явно требуются последующие исследования, так что результат о существовании характерного (третьего) субсекундного масштаба длительных диполизаций представляется предварительным.

(2) Сведений о среднем поведении потоков и спектральных индексов энергичных частиц и их корреляции с вариациями магнитного поля в периоды ПД недостаточно для установления механизма ускорения частиц. Обсуждение механизма ускорения в гл. 3-4 опирается на наблюдения особенностей в спектрах ионов (пики или плато) и различиях их поведения на разных энергиях, а также на рассмотрении корреляции между потоками частиц определенных энергий и магнитными вариациями. Последний подход уместен для ограниченного класса (двумерных) моделей токового слоя, но не является

конструктивным для струйных инжекций (ВВФ). В этом случае ускоряемые частицы могут поступать из разных источников (из области пересоединения, через фланги струи на разных расстояниях и, даже, из области перед фронтом набегающего ДФ (последний случай упоминается как механизм резонансного неадиабатического ускорения). Ввиду различия стартовых положений частиц разных энергий, изменения их потоков и корреляция последних с магнитной вариацией в точке наблюдения будут отличаться, что может объяснить изменение характера корреляции электронных потоков и магнитного поля на энергии 90 кэВ, найденной в гл.4.

С другой стороны, с точки зрения условий применимости адиабатического описания, в рассматриваемой области они очевидно выполняются для электронов, но нарушаются для ионов рассматриваемых энергий, в этом смысле обсуждение в терминах адиабатического (либо неадиабатического) характера ускорения представляется малоинформативным. Представляется что обсуждение механизмов должно основываться на просчете конкретных физических моделей, на что стоит обратить внимание в последующих работах. Повторюсь, что полученные в диссертации сведения о среднем поведении потоков и спектральных индексов энергичных электронов и ионов и их корреляционной связи с вариациями магнитного поля, а также о временных масштабах ускорения и характерных энергиях в периоды ПД интересны сами по себе, вне зависимости от успехов в идентификации механизма.

Приведенные замечания не меняют общего положительного отношения к работе. Диссертационная работа А.Ю. Малыхина «Плазменные явления сопровождающие процесс диполизации магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли» удовлетворяет требованиям ВАК для кандидатских диссертаций, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — «Физика Солнца».

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

профессор кафедры физики Земли
физического факультета СПбГУ

В.А.Сергеев

29.04.2022

Петродворец, ул.Ульяновская д.1,
Санкт-Петербург 198504
Тел. 8(812) 4284627
e-mail: v.sergeev@spbu.ru

Личную подпись
В.А.Сергеев
заверяю
И.О. начальника отдела кадров ИИЭ
И.И. Константинова

29.04.2022

Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>

Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей