

## О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертацию Малыгина Андрея Юрьевича

«Плазменные явления, сопровождающие процесс диполизации магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – физика Солнца

Диссертационная работа Андрея Юрьевича Малыгина посвящена исследованию плазменных процессов, наблюдаемых в хвосте магнитосферы во время продолжительных диполизаций. Автором исследованы механизмы нагрева и ускорения плазмы и генерации волн, связанные с перестройкой конфигурации магнитного поля. Для исследования тонкой структуры магнитоплазменных образований в геомагнитном хвосте использовались данные спутниковых измерений Cluster, THEMIS и MMS, позволившие изучать процесс диполизации с высоким временным разрешением. Автором исследовалось распространение диполизационных фронтов и формирование магнитоплазменных структур, связанных, с их торможением в передней части плазменного слоя геомагнитного хвоста.

Актуальность исследований обусловлена фундаментальным значением процессов, происходящих в хвосте магнитосферы во время геомагнитных возмущений. Продолжительные диполизации, являются проявлениями глобального процесса переноса и высвобождения энергии, накопленной в хвосте магнитосферы, влияют на динамику внутренней магнитосферы и геомагнитную активность. Они формируют условия в околоземном пространстве, которые необходимо учитывать при осуществлении практической деятельности в космосе. Таким образом, поставленная диссертантом задача является актуальной и важной, как в научном плане, так и для практических целей.

Несомненным достоинством работы является удачное сочетание экспериментальных и теоретических подходов. В частности, автором разработаны новые методы работы с данными измерений спутников MMS для исследования токовых структур диполизационных фронтов, их скоростей и направлений их распространения с наиболее высоким в настоящее время пространственным и временным разрешением.

Установлена многомасштабная структура формирующейся зоны диполизации, показано, что наряду с глобальными процессами диполизации, на МГД и ионных кинетических масштабах, присутствуют мелкомасштабные взаимодействующие токовые структуры на электронных кинетических масштабах. Рассмотрены механизмы ускорения электронов и протонов в ходе диполизаций. Определены пределы ускорения электронов бетатронным механизмом и неадиабатического ускорения ионов. Установлена роль свистовых волн, наблюдающихся в зоне диполизации, в обмене энергией между электронами надтепловых энергий.

Полученные результаты исследований отличаются новизной, находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными и представляют несомненный интерес для физики магнитосферы.

Результаты работы А.Ю. Малыхина могут быть использованы в НИИЯФ МГУ, ИПФ, ИЗМИРАН, ИФЗ РАН, СПбГУ, МФТИ, ФИАН, ГАИШ, ИНАСАН, ИСЗФ СО РАН и других российских и зарубежных научных организациях, ведущих работы по физике космической плазмы.

Замечания и комментарии:

1. При проведении исследований, для обработки данных многоспутниковых экспериментов, автор использовал специальные методы и подходы, которые позволяют определить параметры магнитоплазменных структур, формирующихся при торможении быстрых плазменных потоков: MVA-анализ, метод тайминга. Хотя автором дается ссылка на соответствующие источники, следовало бы кратко описать эти методы в тексте диссертации.
2. В разделе 2 выполнены результаты статистического исследования магнитных структур во время диполизаций. Исследовались структура и направление токов в области накопления магнитного поля при торможении плазменных потоков. Хотелось бы понять глобальную структуру токовой цепи. Автором неоднократно упоминался суббуревой токовый клин, предполагающий замыкание в ионосфере через западный электроджет, однако, формирование такой токовой системы не всегда возможно. В частности, не все события из таблицы 2.1 могут рассматриваться, как суббури, связанные с наличием мощного западного электроджета. Кроме того, вызывает сомнение возможность магнитной связи овала полярных сияний с областями, располагающимися в плазменном слое на расстояниях  $15R_E$ .
3. В Разделе 4 используется коэффициент 1.7 усиления потока для определения инъекции (стр. 98). Откуда он берется, и почему он одинаков для разных энергетических каналов?
4. На странице 99 получены расстояния до источников инъекции. Что означают такие значительные расстояния, и почему они разные ( $70$  и  $45 R_E$ ) для разных энергетических каналов?
5. В работе присутствуют опечатки. На странице 40 пропали минусы в выражении  $15 R_E \leq X \leq 7 R_E$ , на странице 41, пропали минусы при значениях AL-индекса в таблице 2.1 (либо требуется указать в заголовке таблицы  $|AL|_{\max}$ ).
6. Иногда используются непривычные термины, типа «субпротонные» токовые структуры (стр.17), пришедшие из других отраслей знаний, или «время-пролетный эффект» (стр.100).  
Раздел 4.1.1, по-видимому, должен называться «Наблюдение электронных инъекций ...»

Сделанные замечания носят редакционный характер и не влияют на общую положительную оценку работы. Характеризуя ее в целом, можно сказать, что настоящая диссертация является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему. Результаты, вынесенные на защиту, полностью отражены и обоснованы в диссертации.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечена квалифицированным использованием аналитических и численных методов, сопоставлением с данными современных экспериментов.

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и опубликованы в 8 статьях, в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и/или SCOPUS. Среди них, высокорейтинговые журналы Geophysical Research Letters, Annales Geophysicae и Journal of Geophysical Research.

Автореферат диссертации полностью соответствует её содержанию. Диссертационная работа «Плазменные явления, сопровождающие процесс диполизации магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли» и её автореферат, удовлетворяют требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а её автор – А.Ю. Малыхин, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – «физика Солнца».

Официальный оппонент

Калегает Владимир Владимирович,

доктор физ.-мат. наук,

Заведующий отделом космических наук

НИИЯФ МГУ

/ Калегает В. В./

12.05.2022

Телефон: +7-905-701-44-93

E-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru

Подпись Калегаета Владимира Владимировича удостоверяю.

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

кандидат физико-математических наук



/ Сигаева Е.А. /