

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН



*[Signature]* А.А. Петрукович

*[Signature]* марта 2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований  
Российской академии наук

Диссертация «Плазменные явления, сопровождающие процесс диполизации магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли» выполнена в отделе Физики космической плазмы Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Малыхин Андрей Юрьевич работал в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2021 г. А.Ю. Малыхин окончил очную аспирантуру Института космических исследований РАН по специальности «Физика Солнца».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2022 г. ИКИ РАН.

Научный руководитель:

- доктор физико-математических наук Григоренко Елена Евгеньевна, работает ведущим научным сотрудником в ФГБУН ИКИ РАН;

По результатам рассмотрения диссертации «Плазменные явления, сопровождающие процесс диполизации магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли» принято следующее заключение:

### **Актуальность темы и направление исследования**

Одной из актуальных проблем магнитосферной физики является проблема трансформации и переноса энергии во время резкой перестройки магнитной конфигурации хвоста, в результате которой в плазменном слое (ПС) возрастает северная компонента ( $B_z$ ) магнитного поля, так называемой диполизации. Процесс диполизации сопровождается ускорением и нагревом окружающей плазмы, изменением анизотропии ионной и электронной функции распределения по скоростям и генерацией различных волновых мод. Эти процессы, происходящие в области ближнего хвоста, в конечном счёте

могут оказывать влияние на динамику внутренней магнитосферы и геомагнитную активность.

Спутниковые наблюдения THEMIS и Cluster позволили изучать процесс диполизации на МГД и ионных кинетических масштабах. Однако эти спутниковые наблюдения не позволяли исследовать процессы трансформации энергии на электронных кинетических масштабах. Также, ввиду недостаточно высокого временного разрешения плазменных измерений, были недоступны для наблюдений процессы взаимодействия волн и частиц на временных масштабах, сопоставимых с длительностями волновых всплесков (~ нескольких секунд). Многоспутниковая миссия MMS, запущенная в 2015 г. и предназначенная для исследования плазменных процессов на электронных масштабах, впервые позволяет изучить тонкую магнитоплазменную и токовую структуру, а также процессы взаимодействия волн и частиц во время продолжительных диполизаций в ближнем хвосте.

Во **Введении** обсуждается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы и положения, выносимые на защиту. Также во введении изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Содержание **первой главы** представляет собой обзор исследований плазменных процессов, наблюдаемых во время диполизаций в геомагнитном хвосте, которые являются основным объектом изучения в данной диссертационной работе. Глава состоит из четырёх разделов. В первом разделе главы обсуждаются современные многоспутниковые наблюдения явления диполизации в геомагнитном хвосте, и её роль в динамике геомагнитного хвоста. Особое внимание уделяется обсуждению уникальных возможностей миссии MMS, которая даёт возможность впервые наблюдать быстрые плазменные процессы, происходящие на электронных кинетических масштабах. Во втором и третьем разделах главы изложены современные представления о механизмах ускорения ионов и электронов во время диполизаций. В последнем разделе главы описана история изучения свистовых волн, от теоретических исследований Сагдеева и Шафранова, до современных спутниковых наблюдений свистовых волн, регистрируемых во время прохождения изолированных ДФ.

Во **второй главе** выполнено исследование многомасштабных магнитных структур, наблюдаемых во время продолжительных диполизаций связанных с суббурями, на основе многоспутниковых наблюдений миссий Cluster и MMS. Данная глава состоит из двух разделов. В первом разделе представлены наблюдения Cluster в геомагнитном хвосте в 2013 году, когда два космических аппарата из четырёх находились на субионных масштабах друг от друга. В результате было показано, что во время продолжительных диполизаций, особенно на фазе роста диполизации наблюдаются мелкомасштабные

локальные магнитные градиенты, указывающие на формирование интенсивных и локализованных токовых структур во время диполизации. Полученные результаты были подтверждены статистическим исследованием.

Позднее такие токовые структуры действительно были обнаружены на фазе роста диполизации миссией MMS. Эти наблюдения представлены во втором разделе данной главы. Были вычислены плотности токов, протекающих внутри объема тетраэдра MMS, характерный масштаб которого составлял несколько электронных гирорадиусов. Установлено наличие тонких интенсивных токовых структур, плотность тока в которых варьировала до  $\sim 60$  нА/м<sup>2</sup>, а характерные пространственные масштабы таких структур составили  $\sim 150 - 470$  км, что существенно меньше гирорадиуса тепловых ионов ( $\leq 0.4\rho_i$ ).

В **третьей главе** представлены статистические исследования динамики потоков и спектров сверхтепловых ионов разных масс во время 14 диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте по наблюдениям энерго-масс спектрометров RAPID миссии Cluster. Показано, что во время диполизаций в ближнем хвосте магнитосферы Земли наблюдаются возрастания потоков различных ионных компонент в следующих диапазонах энергий:  $\sim 83 - 600$  кэВ для  $H^+$ ,  $\sim 287 - 1100$  кэВ для  $He^+$  и  $\sim 560 - 1160$  кэВ для ионов  $O^+$ . Одновременно с увеличением потока ионов в каналах с более высокими энергиями было обнаружено уменьшение потоков в каналах с более низкими энергиями, в результате чего наблюдалось уменьшение значения показателя степенного энергетического спектра  $\gamma$ . Установлена зависимость продолжительности и амплитуды отрицательных вариаций  $\gamma$  от массы ионов, а также показано, что в каждом событии диполизации ускорение тяжелых ионов наблюдалось в течение более длительного промежутка времени после начала диполизации, чем ускорение легких ионов.

В **четвёртой главе** выполнен анализ динамики потоков и спектров энергичных электронов (с энергиями более 40 кэВ). Показано, что имеет место хорошая корреляция между динамикой потока энергичных электронов с энергиями до 90 кэВ и  $B_z$  - компонентой магнитного поля. Для более высоких энергий, данная корреляция оказалась слабее. Анализ, основанный на квазиadiaбатической теории, показал, что бетатронный механизм играет существенную роль в ускорении электронов в диапазоне энергий до  $\sim 90$  кэВ. При этом динамика потоков электронов более высоких энергий плохо описывается бетатронным сценарием и требует учёта других, возможно, неadiaбатических механизмов.

**Пятая глава** посвящена исследованию процессов взаимодействия квази-параллельных свистовых волн, наблюдаемых во время 48 продолжительных диполизаций, с электронной популяцией в диапазоне энергий от 0.6 до 30 кэВ по данным MMS. Наблюдения MMS в быстрой моде измерений с высоким временным разрешением

позволили рассчитать инкремент  $\gamma$  свистовых волн на масштабах длительности волновых всплесков. Показано, что в большинстве событий из собранной базы данных электроны с энергиями  $W_{res} \geq 10$  кэВ иpitch-углами  $\alpha_{res} \sim 100^\circ - 130^\circ$  и  $\alpha_{res} \sim 50^\circ - 80^\circ$  вносят максимальный положительный вклад в инкремент этих волн.

### **Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации**

Научно-исследовательская работа, результаты которой легли в основу диссертации, была выполнена автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке и развитии научных задач. Поиск и анализ событий по данным MMS, а также диполизаций, наблюдаемых спутниками *Cluster*, которые использовались в главах 3 и 4, были выполнены лично автором. Автором был написан пакет программ для анализа и визуализации спутниковых данных. Интерпретация полученных результатов была выполнена либо автором лично, либо совместно с соавторами.

### **Степень достоверности результатов проведенного исследования**

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается 8 публикациями в международных изданиях, входящих в перечень ВАК, а также 8 докладами на российских и международных конференциях.

### **Научная новизна полученных результатов**

Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми. К ним относятся следующие выводы:

1. Впервые показано, что помимо крупномасштабной структуры продолжительной диполизации, также наблюдаются значительные магнитные градиенты и интенсивные токовые структуры на субионных и электронных масштабах. Последние имеют сложную трёхмерную структуру, связанную с импульсами *B*-компоненты магнитного поля, наблюдаемыми во время продолжительной диполизации.

2. Экспериментально подтверждено неадиабатическое ускорение ионов разных масс до энергий  $\geq 600$  кэВ посредством резонансного взаимодействия с ДФ во время продолжительных диполизаций. Статистически установлено, что ускорение протонов происходит в течение  $\sim 1-2$  минут, а ускорение ионов *O*<sup>+</sup> занимает более продолжительное время. Также показано, что тяжёлые ионы ускоряются более эффективно, чем лёгкие ионы.

3. Впервые показано, что ускорением за счёт бетатронного механизма во время диполизаций можно объяснить возрастание потоков электронов с энергиями до  $\sim 90$  кэВ.

4. Для продолжительных диполизаций впервые определены энергетические и питч-угловые характеристики электронов, резонансно взаимодействующих с квазипараллельными свистовыми волнами.

### **Научная и практическая значимость результатов исследования**

Продолжительные диполизации в ближнем геомагнитном хвосте могут представлять собой важное связующее звено между взрывным процессом высвобождения накопленной энергии солнечного ветра в токовом слое (ТС) хвоста магнитосферы Земли и развитием суббури. В этой связи понимание процессов трансформации и передачи энергии во время диполизации имеет важное научное и практическое значение.

Полученные в данной работе экспериментальные подтверждения роли электронной плазменной популяции в формировании мелкомасштабных трёхмерных токовых структур во время диполизации дают стимул для разработки новых теоретических моделей диполизаций.

Определение 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 потоков данных плазменных компонент вблизи геостационарной орбиты.

Определение энергетических и питч-угловых характеристик резонансных электронов, взаимодействующих с квазипараллельными свистовыми волнами, даёт информацию о том, какая часть электронной популяции потенциально может быть рассеяна в конус потерь, и дать вклад в высыпания электронов в авроральной области.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах автора:**

1. Grigorenko E.E., Dubyagin S., Malykhin A.Y., Khotyaintsev Y.V., Kronberg E.A., Lavraud B., Ganushkina N.Y., Intense current structures observed at electron kinetic scales in the near-Earth magnetotail during dipolarization and substorm current wedge 8 formation. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45, 602–611. <https://doi.org/10.1002/2017GL076303>
2. Мальхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Наблюдения спутниками MMS мелкомасштабных магнитных и токовых структур во время продолжительных диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте, *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, 2021, том 47, № 5, с. 401–414, <https://doi.org/10.31857/S0367292121050061>
3. Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Koleva R., Ganushkina N.Y., Kozak L., Daly P.W., Contrasting dynamics of electrons and protons in the near-Earth plasma sheet during dipolarization, *Annales Geophysicae*, 36, 2018, 3, 741-760, <https://doi.org/10.5194/angeo-36-741-2018>
4. Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Daly P.W., Kozak L.V., Acceleration of protons and heavy ions to suprathermal energies during dipolarizations in the nearEarth magnetotail, *Annales Geophysicae*, 37, 2019, 4, 549-559, <https://doi.org/10.5194/angeo-37-549-2019>
5. Мальхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Кронберг Е.А., Дали П.В., Влияние бетатронного механизма на динамику потоков сверхтепловых электронов во время диполизаций в

- геомагнитном хвосте, Геомагнетизм и Аэронавигация, 2018, том 58, № 6, с. 1–9, <https://doi.org/10.1134/S0016794018060093>
6. Мальных А.Ю., Григоренко Е.Е., Шкляр Д.Р., наблюдение узкополосных квазипараллельных свистовых волн в зоне торможения быстрых потоков в ближнем геомагнитном хвосте по данным MMS, Космические исследования, 2021, том 59, № 1, с. 9–18 <https://doi.org/10.31857/S0023420621010052>
  7. Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Shklyar D.R., Panov E.V., Le-Contel O., Avakov L., Giles B. Characteristics of resonant electrons interacting with whistler waves in the nearest dipolarizing magnetotail. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, 2021, <https://doi.org/10.1029/2021JA029440>.
  8. Kronberg E.A., Daly P.W., Grigorenko E.E., Smirnov A.G., Klecker B., Malykhin A.Y. Energetic charged particles in the terrestrial magnetosphere: Cluster/RAPID results. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029273>

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения исследования опубликованы в указанных статьях.

#### **Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.03.03 - Физика Солнца»**

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «01.03.03 - Физика Солнца»: «Солнечно-земная физика и солнечно-земные связи».

**ВЫВОД.** Кандидатская диссертация Мальных Андрея Юрьевича «Плазменные явления, сопровождающие процесс диполизации магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 «Физика Солнца».

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики космической плазмы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 8 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 7 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «18» марта 2022 г.

Председатель НТС отдела 54 ИКИ РАН  
д.ф.-м.н.,



А.А. Петрукович

Секретарь НТС отдела 54 ИКИ РАН  
к.ф.-м.н.



Л.С. Рахманова