

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН



чл. корр. РАН

А.А. Петрукович

2024 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований  
Российской академии наук

Диссертация Шустова Павла Игоревича на тему: «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли» выполнена на базовой кафедре физики космоса при Институте космических исследований Российской академии наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и в отделе физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук. В период подготовки диссертации соискатель Шустов Павел Игоревич работал в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2019 г. окончил магистратуру физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова по специальности 03.03.02 «Физика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в НИУ ВШЭ.

Научный руководитель:

- доктор физико-математических наук, чл. корр. РАН Петрукович Анатолий Алексеевич, работает в ФГБУН ИКИ РАН в должности директора;

По результатам рассмотрения диссертации «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли» принято следующее заключение:

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

Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли обнаружены относительно недавно и являются представителями важного класса субионных магнитных дыр, наблюдаемых в космосе и воспроизводимым в симуляциях, пространственный масштаб которых, порядка

или меньше локального ионного гирорадиуса. Данные структуры представляют большой интерес для физики космической плазмы, поскольку они потенциально играют важную роль в энергообмене между популяциями ионов и электронов за счет вклада в каскад энергии посредством возбуждения волновой активности на электронном масштабе. Также изучение субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы важно вследствие той роли, которую они играют: в генерации сильных холловских электрических полей; в нагреве электронов и рассеянии частиц (спутниковые наблюдения указывают на наличие захваченной данными структурами популяции горячих электронов); в ускорении заряженных частиц (электрическим полем самой магнитной дыры); в генерации сильных токов.

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

Текст диссертации основан на 5 научных публикациях, объединенных одной тематикой исследования в которых соискатель диссертации является первым автором. Постановка и обсуждение задач велась совместно с научным руководителем и коллегами. Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично соискателем. В описании и обсуждении результатов используется несколько иллюстраций, полученных коллегами при совместной с соискателем работе над тематикой исследования.

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

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается 5 публикациями в международных изданиях, входящих в перечень ВАК, а также докладами на российских и международных конференциях.

### **Научная новизна полученных результатов**

Субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли обнаружены относительно недавно (первая работа с их описанием опубликована в 2011 году), и статистических исследований с большим набором данных прямых спутниковых наблюдений по ним не было. Существующие модели не в полной мере описывают наблюдаемые особенности этих магнитных дыр, а также ни один из известных механизмов генерации подобных структур не удовлетворяет набору наблюдательных фактов. Поэтому, в рамках данной работы:

- 1) Впервые собрана и изучена подробная статистика наблюдений субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы Земли по данным спутниковой миссии THEMIS за три года. В рамках анализа данной статистики, путем сравнения с результатами численного

моделирования, впервые установлено, что источником этих структур являются неустойчивости, развивающиеся на диполяризационном фронте.

2) Найдена и исследована мода линейных колебаний в трехкомпонентной плазме (компонента ионов и две компоненты электронов с разными температурами и плотностями), параметры которой (при почти перпендикулярном к магнитному полю распространении) соответствуют наблюдаемым свойствам плазмы вблизи изучаемых субионных магнитных дыр. Впервые выдвинута гипотеза, что субионные магнитные дыры могут являться нелинейной стадией эволюции данной моды.

3) Впервые показано, что одним из источников мелкомасштабной структуры в полярном сиянии (диффузионной авроре) являются субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли.

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

Субионные магнитные дыры, являясь устойчивыми магнитоплазменными структурами, и обеспечивая нелинейные возмущения магнитного поля и теплового давления электронов на субионных масштабах (порядка и менее ионного гирорадиуса) могут играть важную роль в рассеянии и захвате частиц. В частности, в работе показано, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли обеспечивают процесс переноса горячей компоненты электронов, нагретой на фронте диполяризации, в область спокойной плазмы за фронтом (в область диполяризованного хвоста). Горячая компонента электронов, локализованная внутри магнитных дыр, представляет собой неоднородность, с которой активно взаимодействуют электронные циклотронные волны, излучаемые фоновыми электронами. Также, показано, что сами дыры должны взаимодействовать с фоновыми субтепловыми ионами (за счет обнаруженного дрейфа самих дыр). Таким образом, субионные магнитные играют существенную роль в важном вопросе переноса энергии между компонентами плазмы в хвосте магнитосферы.

В работе представлены стационарные модели субионных магнитных дыр, которые могут быть применены для моделирования рассеяния заряженных частиц на структуре магнитных дыр. Такое моделирование может пролить свет на важный вопрос термализации электронов в хвосте магнитосферы. В частности, в работе построена трехмерная модель магнитных дыр, позволяющая исследовать объемное распределение токов и магнитных полней.

Помимо прочего, значимым научным результатом данной работы, является детальное описание и изучение новой плазменной моды линейных колебаний трехкомпонентной плазмы (компонента ионов и две компоненты электронов с разными температурами и плотностями), характерной для наблюдаемых субионных магнитных

дыр. Также, в данной работе представлено исследование, устанавливающее связь между мелкомасштабными структурами диффузионной авроры (полярных сияний) и субионными магнитными дырами в хвосте магнитосферы. Данный результат является значимым как для изучения авроральных сияний, так и в общем контексте магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. P. I. Shustov, A. V. Artemyev, I. Y. Vasko, E. V. Yushkov; Kinetic models of sub-ion cylindrical magnetic hole. *Phys. Plasmas* 1 December 2016; 23 (12): 122903.
2. Shustov, P., Artemyev, A., Yushkov, E. et al. 3D Magnetic Holes in Collisionless Plasmas. *Plasma Phys. Rep.* 44, 729–737 (2018).
3. Shustov, P., et al. (2019). Statistical properties of sub-ion magnetic holes in the dipolarized magnetotail: Formation, structure, and dynamics. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 342–359.
4. P.I. Shustov, Y. Nishimura, A.V. Artemyev, X.-J. Zhang, V. Angelopoulos, A.A. Petrukovich, In-situ and optical observations of sub-ion magnetic holes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 208, 2020, 105365, ISSN 1364-6826
5. P. I. Shustov, A. V. Artemyev, A. S. Volokitin, I. Y. Vasko, X.-J. Zhang, A. A. Petrukovich; Electron magnetosonic waves and sub-ion magnetic holes in the magnetotail plasma. *Phys. Plasmas* 1 January 2022; 29 (1): 012902.

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 «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»**

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»: «Магнитосферы и ионосферы Земли, планет и экзопланет» и «Теоретические и экспериментальные исследования космической плазмы».

**ВЫВОД.** Кандидатская диссертация Шустова Павла Игоревича «Магнитные дыры 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 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики космической плазмы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 14 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «25» июня 2024г.

Председатель НТС отдела 54 ИКИ РАН  
чл.-корр. РАН

А.А. Петрукович

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

Л.С. Рахманова