

УТВЕРЖДАЮ
Проректор Национального
исследовательского университета
«Высшая школа экономики»
К.Э.Н., доцент Рощин Сергей Юрьевич
« 04 » *8* 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Диссертация Шустова Павла Игоревича на тему: «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли» выполнена на базовой кафедре физики космоса Института космических исследований Российской академии наук факультета физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

В 2019 г. окончил магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» по направлению 03.04.02 «Физика».

В 2023 г. Шустов Павел Игоревич окончил очную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность (профиль) «Физика космоса, астрономия».

В период подготовки диссертации соискатель ученой степени Шустов Павел Игоревич работал в отделе физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук Петрукович Анатолий Алексеевич является директором федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук, а также заведующим базовой кафедрой физики космоса Института космических исследований Российской академии наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Актуальность темы

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.

Научные положения диссертации

1) Показано, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли связаны с развитием (баллонной/перестановочной) неустойчивостей горячей анизотропной популяции электронов на фронте диполяризации, и обеспечивают перенос горячих электронов через фронт диполяризации.

2) Разработаны одномерные кинетические и трехмерная магнитогидродинамическая модели субионных магнитных дыр, в рамках которых установлены ограничения на параметры данных нелинейных плазменных структур.

3) Обнаружена и исследована электромагнитная мода линейных колебаний в трехкомпонентной плазме (компонента ионов и две компоненты электронов с разными температурами и плотностями), характеристики которой соответствуют свойствам наблюдаемых субионных магнитных дыр в хвосте магнитосферы. Сравнение с данными спутниковых наблюдений показало, что рассмотренная электронно-магнитозвуковая мода является наилучшим кандидатом на роль линейной стадии генерации субионных магнитных дыр.

4) Показано, что субионные магнитные дыры в хвосте магнитосферы могут являться источником мелкомасштабной структуры полярных сияний и, таким образом, поддерживают магнитосферно-ионосферную связь на малых пространственных масштабах.

Обоснованность научных положений

Обоснованность научных положений подтверждается согласием полученных результатов с результатами теоретических и экспериментальных работ, имеющимися на данный момент в литературных источниках.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты, представленные в настоящей работе, получены соискателем лично, либо совместно с соавторами при непосредственном участии соискателя.

Степень достоверности результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным подходом изучения объекта исследования, считающим в себе анализ данных наблюдений космических аппаратов и их сопоставление с результатами численного моделирования и теоретическими предсказаниями. Используемые наблюдательные данные взяты из открытых источников, являются предварительно обработанными и верифицированными, а также апробированными в большом количестве опубликованных научных работ. Корректность оригинальных методов, применяемых

для численного моделирования, подтверждена тестированием на задачах с известными решениями, а также физичностью и самосогласованностью результатов. Достоверность теоретических предсказаний обусловлена корректностью представленных аналитических выкладок и согласованностью с известными физическими законами. Непротиворечивость и согласованность всех подходов обеспечивает высокую степень достоверности представленной работы.

Научная новизна работы

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.

Теоретическая значимость

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 дыры играют существенную роль в важном вопросе переноса энергии между компонентами плазмы в хвосте магнитосферы.

Практическая значимость результатов проведенных соискателем ученой степени исследований

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 полей.

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.

Апробация работы

Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе:

- Международная конференция «Problems of Geocosmos» (СПбГУ, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, 2016 г.). Доклад «Model of Subproton-Scale Magnetic Holes».
- Ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (ИКИ РАН, Россия, Москва). Доклад в 2017 г. «Кинетическая модель аксиально-симметричных магнитных дыр суб-ионного масштаба»; доклад в 2018 г. «Магнитные дыры в диполизированном плазменном слое: спутниковые наблюдения и теоретические модели»).
- Ежегодный семинар «Physics of Auroral Phenomena» (ПГИ РАН, Россия, Апатиты). Доклад в 2017 г. «Kinetic models of sub-ion cylindrical magnetic hole»; доклад в 2018 г. «Sub-ion magnetic holes in the dipolarized magnetotail: Satellite observations and theoretical models»; доклад в 2019 г. «Sub-ion magnetic holes: In-situ observations and possible connection to optical data»).
- Ежегодная международная конференция «American Geophysical Union Fall Meeting» (United States). New Orleans доклад в 2017 г. «Magnetic holes in the dipolarized magnetotail: ion and electron anisotropies»; San Francisco доклад в 2019 г. «In-situ and optical observations of sub-ion magnetic holes».
- Ежегодная международная конференция «European Geosciences Union General Assembly» (Austria, Vienna). Доклад в 2018 г. «Sub-ion magnetic hole in depolarized magnetotail: evidences of the electron energization»; доклад в 2021 г. «Sub-ion magnetic holes in the plasma injection region: origins and dynamics».
- Международная конференция «5th Cluster-THEMIS workshop» (Greece, Crete, Chania, 2018). Доклад «Statistical properties of sub-ion magnetic holes in the dipolarized magnetotail: formation, structure, and dynamics»)
- Международная конференция «29th Cluster workshop» (Spain, Canary Island, Lanzarote, 2019). Доклад «In-situ and optical observations of sub-ion magnetic holes»).

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 5 работах общим объемом 3.00 п.л.; личный вклад автора составляет 2.00 п.л.

Научная публикация	Личный вклад	Публикация входит в		
		международные базы данных и системы цитирования (Web of Science/ Scopus/ MathSciNet...)	Список рекомендованных журналов НИУ ВШЭ**	Перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК
1. P.I. Shustov, A.V. Artemyev, I.Y. Vasko, E.V. Yushkov. Kinetic models of sub-ion cylindrical magnetic hole // Physics of Plasmas, 1 December 2016; 23 (12): 122903.	в соавт., 0,5 п.л.	Web of Science, Q2, Scopus, Q1	да, список С	да
2. Shustov, P., Artemyev, A., Yushkov, E. et al. 3D Magnetic Holes in Collisionless Plasmas // Plasma Physics Reports. 2018. 44, 729–737.	в соавт., 0,5 п.л.	Web of Science Q4, Scopus, Q2	да, список С	да
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. 2019. 124, 342–359.	в соавт., 0,5 п.л.	Web of Science Q2, Scopus, Q2	да, список А	да
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, 2020, Volume 208, 105365, ISSN 1364-6826	в соавт., 0,25 п.л.	Web of Science Q3, Scopus Q3	да, список С	да
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	в соавт., 0,25 п.л.	Web of Science Q2, Scopus Q1	да, список С	да

the magnetotail plasma // Physics of Plasmas, 1 January 2022; 29 (1): 012902.				
---	--	--	--	--

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения.

Ценность научных работ соискателя ученой степени

Ценность научных работ соискателя подтверждается публикациями в ведущих международных рецензируемых изданиях.

Диссертация Шустова Павла Игоревича на тему: «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли» – это законченная научно-квалификационная работа, которая соответствует: требованиям пунктов 9, 10, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а также Паспорту научной специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

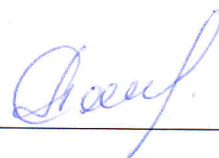
Диссертация Шустова Павла Игоревича на тему: «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Заключение принято на заседании базовой кафедры физики космоса Института космических исследований Российской академии наук факультета физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», протокол № 2 от 25 июня 2024 г.

Присутствовало на заседании 29 человек. Участвовало в голосовании 8 человек.

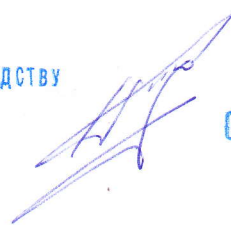
Результаты голосования: «за» – 8 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек.

Профессор базовой кафедрой физики космоса
Института космических исследований
Российской академии наук
факультета физики НИУ ВШЭ,
доктор физико-математических наук,
профессор



Попель Сергей Игоревич

Подпись заверяю

02.07.2024