

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

Московского государственного

университета имени М.В. Ломоносова

Профессор А.А. Федянин



«30» сентября 2024 г.

О Т З Ы В

Ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Шустова Павла Игоревича «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

Диссертация П. И. Шустова посвящена анализу мелкомасштабных структур в ночные часы магнитосферы Земли за фронтом диполизации с пониженной по сравнению с окружающей плазмой величиной магнитного поля и повышенным давлением электронов, которые принято называть магнитными дырами. Предполагается, что формирование таких структур обусловлено диамагнитным эффектом в результате компенсации понижения давления магнитного поля давлением плазмы. В работе подробно анализируются субионные магнитные дыры, пространственный масштаб которых порядка или меньше локального ионного гирорадиуса.

Актуальность исследования обусловлена отсутствием теории формирования субионных магнитных дыр, которая смогла бы описать их свойства, что

определило **цель исследования** и поставленные **задачи**. В поставленные задачи входили определение усредненных характеристик субионных магнитных дыр в ходе статистического анализа спутниковых наблюдений и разработка непротиворечивой гипотезы их формирования, построение моделей, описывающих свойства наблюдаемых дыр. Необходимо было, первоначально в линейном приближении, выделить моду плазменных колебаний, которая могла бы приводить к формированию исследованных структур в нелинейном режиме, и попытаться связать результаты теоретического анализа с наблюдениями авроральных структур. **Научная новизна** исследования была обусловлена отсутствием статистических исследований субионных магнитных дыр, рассматривающих большой набор данных высокоапогейных спутниковых наблюдений. **Достоверность** полученных результатов основывается на использовании надежных экспериментальных данных, современного математического аппарата и сравнении расчетных и экспериментальных данных

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списков литературы, рисунков и таблиц, одного Приложения. Список литературы включает 224 наименования. В работу включены 37 рисунков и одна таблица.

Во введении дан краткий обзор наблюдений локализованных депрессий магнитного поля с разными масштабами в космофизических объектах. Обоснована актуальность темы работы. Приведены ее цели и задачи. Рассмотрены объект и предмет исследования. Резюмированы ее результаты.

В первой главе описываются статистические результаты определения свойства субионных магнитных дыр, выделенных в ходе исследований спутниковой миссии THEMIS. Описаны методики получения характеристик субионных магнитных дыр. Изучены характеристики функции распределения электронов внутри выделенных магнитных дыр. Показано, что наблюдаемая анизотропия функции распределения связана с адиабатическим ускорением во время диполизации. Приводятся также результаты моделирования методом

частиц в ячейках процесса формирования фронта диполизации и ускорения частиц. Показано, что субионные магнитные дыры локализованы вблизи экваториальной плоскости.

Во второй главе проведен линейный анализ плазменных колебаний в трехкомпонентной плазме, состоящей из фоновых компонент ионов и электронов, и горячей компоненты анизотропных электронов. Определялась мода, свойства которой соответствовали бы свойствам наблюдаемых субионных магнитных дыр. Такими свойствами считались направление распространения, скорость, поляризация, возмущения плотности и температуры. В МГД приближении получена система соответствующих уравнений и её приближенное аналитическое решение. Приведены результаты вычислений дисперсионных соотношений и дисперсионных кривых. Показано, что выделенная мода обладает рядом характеристик близких к усредненным характеристикам субионных дыр. Идентифицированная мода названа автором электронно-магнитозвуковой модой, так как она близка к магнитозвуковым волнам, в которых роль ионов играют холодные электроны,

В третьей главе приведены результаты моделирования формирования субионных магнитных дыр в кинетическом и магнитогидродинамическом приближениях. В ходе кинетического анализа рассматривалась цилиндрическая геометрия равновесных конфигураций плазмы с осью симметрии вдоль фонового магнитного поля как с изотропной, так и с анизотропной функцией распределения электронов. С использованием магнитогидродинамической модели анализируется равновесная плазменная конфигурация в приближении наличия строгой иерархии пространственных масштабов. Получено трехмерное решение, применимое не только к анализу субионных магнитных дыр, но и к любым вытянутым крупномасштабным равновесным магнитоплазменным равновесным конфигурациям. Приведены распределения магнитного поля и токов в двумерном и трехмерном случаях. Показано, что в результате трехмерного моделирования в структуре возникают продольные токи.

Четвертая глава содержит результаты сравнения масштабов субионных магнитных дыр, зарегистрированных вблизи экваториальной плоскости по данным THEMIS, и масштабов одновременно наблюдаемых авроральных структур на наземной сети наблюдений миссии THEMIS для события 17 февраля 2010 г. При проецировании положения спутников на ионосферу использована модель Цыганенко-2001. Автор предположил, что магнитные дыры могут являться источниками мелкомасштабных полярных сияний. Но, фактически, после проецирования вдоль магнитных силовых линий, доказано, что масштаб структур в полярном сиянии сопоставим с масштабом магнитных дыр.

В Заключение приводятся основные результаты проделанной работы.

Приложение А содержит описание аналитического решения дисперсионных уравнений.

Работа, в целом, не свободна от некоторых недостатков, указание которых, в основном, может помочь автору в развитии исследований равновесных магнитных конфигураций и магнитных дыр. Исследование показало, что возникновение субионных магнитных дыр тесно связано с одновременно наблюдаемой турбулентностью, но связь наблюдаемых магнитных дыр с характеристиками турбулентности в тексте диссертации, практически, не рассматривается. Не обсуждаются возможные эффекты нарушения квазинейтральности на масштабах рассматриваемых структур. Встречаются опечатки и ошибки стилистического характера. Однако, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Диссертация является законченным научным исследованием, имеющим научную новизну и практическую ценность. Автором получен ряд значимых научных результатов. Не вызывает сомнений обоснованность и достоверность выводов и заключений. Результаты работ могут быть использованы в будущих научных исследованиях и при решении проблем, возникающих при попытках предсказания эффектов, связанных с космической погодой. Результаты

выполненных работ доложены на всероссийских и международных научных конференциях, опубликованы в 5 статьях в журналах, включенных в списки ВАК, WOS и Scopus, в которых автор диссертации является первым автором. Работа ясно написана. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация П.И.Шустова «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а сам Павел Игоревич Шустов безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Отзыв составил

Главный научный сотрудник Отдела космических наук,
д.ф.-м.н., профессор



Антонова Е.Е.

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на семинаре Отдела космических наук 25 сентября 2024 г.

Заведующий Отделом космических наук
д.ф.-м.н.



Каллегаев В.В.

Директор НИИЯФ МГУ,
профессор, член-корреспондент РАН



Боос Э.Э.