

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН



чл. корр. РАН

А.А. Петрукович

« 5 » апреля 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований
Российской академии наук

Диссертация Лукина Александра Сергеевича «Кинетика ночной магнитопаузы магнитосферы Земли» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук выполнена в отделе Физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и на базовой кафедре физики космоса при Институте космических исследований РАН федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). В период подготовки диссертации соискатель Лукин Александр Сергеевич работал в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2019 г. А. С. Лукин окончил магистратуру факультета физики НИУ ВШЭ по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». С 2019 г. по настоящее время является аспирантом очной формы аспирантуры НИУ ВШЭ по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 г. 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 «Кинетика ночной магнитопаузы магнитосферы Земли» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Диссертационная работа Лукина Александра Сергеевича посвящена экспериментальному изучению кинетической структуры ночной магнитопаузы Земли, в частности – конфигурации и пространственного масштаба ее токового слоя.

Актуальность работы обусловлена комбинацией нескольких факторов: во-первых, важной ролью, которую ночная магнитопауза (а точнее ее токовый слой) играет в транспорте заряженных частиц солнечного ветра в магнитосферу Земли, и уникальной ситуацией с доступными данными спутниковых измерений, которая сложилась благодаря нескольким годам одновременного мониторинга ночной магнитопаузы двумя многоспутниковыми миссиями – MMS и ARTEMIS. Наблюдения миссии ARTEMIS, с 2010 года работающей на лунной орбите, впервые позволяют провести статистический анализ свойств ночной фланговой магнитопаузы Земли на больших радиальных расстояниях от Земли, а совместные наблюдения миссий ARTEMIS и MMS позволяют изучить вариацию структуры ночной магнитопаузы с изменением радиального расстояния от планеты.

Во-вторых, помимо важности структуры токового слоя магнитопаузы в контексте его устойчивости и транспорта частиц, следует отметить, что фланговая магнитопауза – наиболее доступная для исследования система с токовыми слоями с малыми величинами плазменного бета и малым вкладом динамического давления плазмы. Как следствие, она представляет собой идеальную систему для статистического изучения бессиловых конфигураций токового слоя. Помимо фланговой магнитопаузы данный класс токовых слоев наблюдается в солнечном ветре, в дальнем хвосте магнитосферы Земли, в холодной плазме хвоста магнитосферы Марса и плазме малой плотности хвоста магнитосферы Юпитера. Таким образом, фланговая магнитопауза является естественной лабораторией по изучению редкого в магнитосфере Земли, но распространённого в гелиосфере класса токовых слоёв.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично автором диссертации. Физические постановки задач, рассмотренных в диссертационной работе, принадлежат

научному руководителю, а исследования и результаты – соискателю. Соискателем осуществлялись: сбор и обработка данных, проведение расчетов, математическая постановка задач, написание и тестирование программ для обработки данных и численных расчетов, обучение нейронных сетей, анализ полученных результатов, подготовка и написание текстов публикаций, взаимодействие с рецензентами и редакторами в процессе публикации статей.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается 4 публикациями в международных изданиях, входящих в перечень ВАК, а также 11 докладами на российских и международных конференциях.

Научная новизна полученных результатов

Собранная и использованная статистика наблюдений ночной магнитопаузы спутниковой миссией ARTEMIS не имеет аналогов в литературе. Сама возможность сбора такого набора данных появилась лишь в последнее десятилетие, что автоматически делает полученные в рамках его анализа результаты новыми.

Аналогичная ситуация имеет место и со статистикой одновременных наблюдений MMS и ARTEMIS, сама возможность сбора которых появилась лишь после 2016 года и была впервые использована в исследованиях, лежащих в основе данной диссертационной работы. Как следствие, полученные по обоим наборам данных результаты не имеют прямых аналогов в литературе и являются абсолютно новыми.

Использованный в третьей главе алгоритм машинного обучения, разработанный для поиска инвариантов движения частиц в Гамильтоновых системах, ранее не применялся к задачам о динамике ионов в токовых слоях, т.е. новизна полученных и представленных в третьей главе результатов обеспечена использованием инновационных теоретических подходов к решению задачи о существовании стационарных плазменных равновесий.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Впервые проведен статистический анализ свойств фланговой ночной магнитопаузы Земли по данным спутниковой миссии ARTEMIS, и показано, что на больших расстояниях от планеты магнитопауза представляет собой многомасштабную структуру, состоящую из переходных слоёв плотности, температуры и кинетической энергии плазмы различной толщины, с характерными масштабами порядка 3000 км, сопоставимыми с гирорадиусом

ионов плазменного слоя. Этот результат может иметь определяющее значение для построения моделей устойчивости токового слоя магнитопаузы и транспорта плазмы солнечного ветра в магнитосферу.

Приведенные в первой главе результаты показывают, что отношение ионной и электронной температур поперек магнитопаузы на лунной орбите остается постоянным $\frac{T_i}{T_e} \approx 5 - 10$, и транспорт плазмы из магнитослоя в плазменный слой на лунной орбите может объяснить отношение $\frac{T_i}{T_e}$ для холодного плазменного слоя. Этот результат указывает на то, что низкочастотные флуктуации магнитного поля, наблюдаемые в магнитослое, могут вносить существенный вклад в динамику частиц вблизи магнитопаузы и приводить к термализации ионной популяции магнитослоя. Значимость этого результата состоит в прямом экспериментальном подтверждении необходимости учета низкочастотных электромагнитных колебаний при моделировании динамики частиц вблизи магнитопаузы.

Впервые проведен статистический анализ сопряженных наблюдений магнитопаузы Земли миссиями ARTEMIS и MMS. Показано, что токовый слой ночной магнитопаузы на разных радиальных расстояниях представляет собой самоподобную кинетическую структуру: конфигурация магнитного поля и толщина токового слоя, измеренная в масштабах тепловых гирорадиусов протонов магнитосферы, остаются неизменными в диапазоне радиальных расстояний от 10 до 60 радиусов Земли. Как следствие магнитопауза как в ближнем, так и в дальнем хвосте может быть описана одним и тем же классом моделей токовых слоёв. Основная значимость полученных результатов состоит в существенном ограничении класса теоретических подходов, применимых для моделирования процессов вблизи магнитопаузы: типичные пространственные масштабы токового слоя магнитопаузы и переходных областей плазменных параметров сопоставимы с гирорадиусом ионов магнитосферы, т.е. для аккуратного описания динамики частиц вблизи магнитопаузы необходимо использовать кинетические или гибридные модели.

Впервые для анализа динамики ионов в токовом слое ночной магнитопаузы применен метод машинного обучения AI Poincaré и показано, что для работы алгоритма вместо численно рассчитанных траекторий частиц можно использовать соответствующие им сечения Пуанкаре. Основным результатом данного анализа состоит в том, что в присутствии нормальной к поверхности магнитопаузы компоненты магнитного поля ее токовый слой необходимо описывать динамическим равновесием, в то время как статических равновесий, существующих на длительных временных интервалах, по-видимому, не существует. Значимость этого результата определяется ролью токового

слоя в транспорте частиц солнечного ветра в магнитосферу. Кроме того, дополнительную ценность полученным результатам придаёт тот факт, что конфигурация токового слоя магнитопаузы является универсальной для ряда плазменных систем, и, в частности, повторяет конфигурацию кинетических токовых слоёв солнечного ветра, магнитослоя и хвостовых областей магнитосфер Марса и Юпитера.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. Lukin, A., Vasko, I., Artemyev, A., & Yushkov, E. (2018). Two-dimensional self-similar plasma equilibria. *Physics of Plasmas*, 25(1), 012906, <https://doi.org/10.1063/1.5016178>
2. Lukin, A. S., Artemyev, A. V., Petrukovich, A. A., Angelopoulos, V., Runov, A., Wang, C. P., & Yushkov, E. V. (2019). Spatial scales and plasma properties of the distant magnetopause: Evidence for selective ion and electron transport. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(7), 5027-5041, <https://doi.org/10.1029/2019JA026638>
3. Lukin, A. S., Panov, E. V., Artemyev, A. V., Petrukovich, A. A., Haaland, S., Nakamura, R., ... & Strangeway, R. J. (2020). Comparison of the Flank Magnetopause at Near-Earth and Lunar Distances: MMS and ARTEMIS Observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(11), e2020JA028406, <https://doi.org/10.1029/2020JA028406>
4. Lukin, A. S., Artemyev, A. V., Vainchtein, D. L., & Petrukovich, A. A. (2022). Regimes of ion dynamics in current sheets: The machine learning approach. *Physical Review E*, 106(6), 065205, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.065205>

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 Лукина Александра Сергеевича «Кинетика ночной магнитопаузы 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 7 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 7 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «30» марта 2023 г.

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



А.А.Петрукович

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



Л.С.Рахманова