

**Отзыв**  
официального оппонента

на диссертацию **Лукина Александра Сергеевича**  
«Кинетика ночной магнитопаузы магнитосферы Земли»,

представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертационная работа Александра Сергеевича Лукина посвящена исследованию ночной магнитопаузы магнитосферы Земли.

**Актуальность этой темы** обусловлена важнейшей ролью магнитопаузы как части переходной области от солнечного ветра к магнитосфере, структура и динамика которой определяет баланс энергии и частиц между этими объектами. Ночная магнитопауза до недавнего времени оставалась недоступной для космических аппаратов и поэтому была мало изучена по сравнению с дневной магнитопаузой. Вместе с тем, именно в ночной области формируются потоки плазмы в хвост магнитосферы, где происходит образование и разрушение токового слоя, сопровождаемое нагревом плазмы, ускорением отдельных популяций заряженных частиц и переносом плазмы вглубь магнитосферы.

Возможность экспериментального исследования ночной магнитопаузы появилась с появлением спутников ARTEMIS (2010) и MMS (2016), орбиты которых дополняют друг друга и позволяют сопоставить свойства магнитопаузы на больших радиальных расстояниях. На основе данных, полученных с этих спутников, автор диссертации выделил и проанализировал результаты наблюдений ночной магнитопаузы, в том числе, результаты одновременных наблюдений спутниками обеих миссий. Такая работа была проведена впервые, что обуславливает **новизну описываемых в диссертации результатов**.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Введение содержит общую формулировку проблемы, обоснование ее актуальности, постановку задач исследования и подробный обзор используемых данных и применяемых методов.

Первая глава посвящена изучению характерных масштабов магнитопаузы в области лунной орбиты по данным двух спутников миссии ARTEMIS. Здесь, в частности, получено, что эти масштабы довольно сильно флуктуируют, но по порядку величины близки к гирорадиусу тепловых ионов плазменного слоя. Продемонстрировано увеличение полной энергии электронов при движении из магнитослоя в плазменный слой и сохранение полной энергии ионов и отношения ионной и электронной температур.

Во второй главе проанализированы сопряженные близкие во времени пересечения магнитопаузы спутниками миссий MMS и ARTEMIS на различных расстояниях

от Земли. Показано, что статистически усредненная конфигурация токового слоя фланговой магнитопаузы и его характерный пространственный масштаб, выраженный в гирорадиусах протонов плазменного слоя, практически не изменяются при удалении от орбиты миссии MMS (геоцентрическое расстояние  $\sim 15$  радиусов Земли) до орбиты миссии ARTEMIS ( $\sim 60$  радиусов Земли).

В третьей главе исследована структура токового слоя магнитопаузы и свойства ионной популяции, поддерживающей данный токовый слой. С этой целью проведен машинный поиск интегралов движения ионов для нескольких одномерных конфигураций токового слоя, типичных для ночной магнитопаузы. Для исследования динамики ионов в токовом слое магнитопаузы автором использован машинный метод AI Poinsage, являющийся обобщением метода главных компонент на случай нелинейной формы вложенного в фазовое пространство многообразия, на котором лежат траектории динамической системы. Показано, что число инвариантов движения не превышает трех, причем область фазового пространства, где существуют три инварианта, достаточно узка. Как следствие, стационарное состояние рассмотренных конфигураций токового слоя оказывается невозможным, т.е. они должны разрушаться или эволюционировать в двумерные структуры.

Характеризуя полученные результаты в целом, отмечу их высокую достоверность, основанную на детальном знании и грамотном применении автором широкого круга методов анализа данных и физических законов для интерпретации результатов анализа. Процедура получения результатов изложена весьма скрупулезно и последовательно. В диссертации приведена представительная библиография по всем обсуждаемым вопросам.

Есть некоторые замечания по авторской интерпретации результатов. Так, в первом положении, выносимом на защиту, сказано, что постоянство отношения температур ионов и электронов “указывает на доминирующую роль низкочастотных флуктуаций магнитного поля в транспорте плазмы магнитослоя в магнитосферу”. Но в тексте главы связь между ролью флуктуаций и постоянством отношения температур обсуждается недостаточно четко. Кроме того, на рис. 1.15 довольно велик разброс значений и не очень велико как полное число событий, так и особенно число событий с большой амплитудой флуктуаций. Поэтому статистическая значимость утверждения о том, что “для сильных флуктуаций ширина переходных областей была меньше”, вызывает некоторые сомнения.

Результат о постоянстве характерного масштаба токового слоя в единицах ионных гирорадиусов, полученный во второй главе, было бы интересно обсудить в контексте баланса давлений: является ли этот установленный факт сторонним (внешним) по отношению к балансу давлений или масштаб токового слоя и баланс давлений взаимосвязаны? Это замечание носит характер пожелания для будущей работы.

Еще одно замечание касается обзора литературы по моделям токовых слоёв в главе 3. Работы [265–266] (Кочаровский и др.) упоминаются здесь в подтверждение слов о периодичности решений уравнения Грэда-Шафранова в неограниченной области. Знакомство с этими работами показывает, что возможны и изолированные решения этого уравнения в неограниченной области (их можно составить как волновой пакет из периодических решений). Проблема получения периодического решения для нелинейного случая более сложна, но и такое решение возможно. Кроме того, автор упоминает уравнение Грэда-Шафранова в узком контексте МГД моделей, но как раз в упомянутых работах анализируется общий случай получения этих уравнений из кинетических уравнений и поиска их решений на основе кинетического подхода.

Завершая перечень замечаний по существу, отмечу некоторую неясность противопоставления “стационарной кинетической модели” токового слоя “динамическому равновесию” в главе 3. По-видимому, под динамическим равновесием имеется в виду квазистационарная конфигурация, которая эволюционирует вплоть до разрушения. Тогда “динамическое равновесие” — это не вполне уместный термин, поскольку он широко употребляется как раз для полностью стационарных ситуаций с балансом различных факторов (в частности, сил).

Диссертация написана грамотно, в целом хорошо структурирована и легко читается. Однако есть некоторые замечания по стилю изложения, приведенные ниже.

Во Введении автор лишь одним словом упоминает устойчивость токового слоя. Было бы уместно несколько углубиться в эту тему, чтобы убедить читателя в актуальности исследования различных конфигураций токовых слоёв.

К стилистическим недостаткам можно также отнести смешение понятий “научные положения” и “полученные результаты”. Первое относится к научным фактам и не предполагает упоминания работы, проведенной для установления того или иного положения.

Заключение к первой главе содержит довольно подробное обсуждение роли кинетических альфвеновских волн в переносе частиц в области магнитопаузы. Это обсуждение не имеет характера подведения итогов сказанного в остальной части главы, а имеет самостоятельное значение. Поэтому ему целесообразно было посвящать дополнительный раздел главы.

Что касается главы 3 (точнее, разделов 3.9–3.11), то здесь не хватает явных ссылок на метод, которым получены карты количества интегралов движения. Автор увлекается вполне разумным физическим объяснением характера движения, но в результате при чтении разделов оказывается не очевидной значимость использования столь продвинутого машинного метода для оценки количества интегралов движения.

Автор практически всюду использует слово “транспорт” вместо “перенос”, что не совсем соответствует литературным нормам. То же можно сказать о слове “лобы” вместо “доли хвоста” и о слове “датасет” вместо “набор данных”. Слово “амплитуда”

принято использовать при характеристике колебаний, но в диссертации им заменяется слово “величина”.

Слово “гамильтоновы” (например, с.20) и другие аналогичные слова пишутся со строчных букв.

Есть небольшое количество опечаток (например, с.36, строка 11, с.38, строка 4 снизу, с.77, строка 2 снизу, подпись к рис.2.6 и т.д.).

Высказанные замечания не отменяют общей высокой оценки диссертационной работы. Результаты, полученные автором и изложенные в диссертации, являются новыми и значимыми. Они получены с использованием современных экспериментальных данных спутниковых наблюдений, с применением апробированных методов физики и математики для анализа и интерпретации данных и результатов расчетов. Эти результаты могут быть использованы в научных учреждениях, ведущих исследования по физике магнитосферы и солнечно-земных связей: ПГИ, ИСЗФ СО РАН, СПбГУ, ИПФ РАН им. Гапонова-Грехова, НИИЯФ МГУ и др.

Результаты полностью опубликованы в 4 статьях в рецензируемых международных журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в международных системах цитирования, а также представлены на авторитетных российских и международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Александра Сергеевича Лукина на тему: «Кинетика ночной магнитопаузы магнитосферы Земли» выполнена на высоком уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу. Она полностью удовлетворяет требованиям “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор — Лукин Александр Сергеевич — несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

*Официальный оппонент:*

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический институт» (ПГИ)

доктор физ.-мат. наук, доцент

Демехов Андрей Геннадьевич

*Контактные данные:*

184209, г.Апатиты, Академгородок, 26а

телефон: (81555) 79-475, e-mail: demekhov@pgia.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.08 — физика плазмы, физико-математические науки

Подпись А. Г. Демехова заверяю.

Зам. директора ПГИ

к.ф.-м.н.



К. Г. Орлов

24.08.2023 г.