

## **ОТЗЫВ официального оппонента**

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук **Лаврухина Александра Сергеевича** на тему «Магнитосферы небесных тел в разных условиях обтекания потоком замагниченной плазмы» по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

**Актуальность темы.** Актуальность проведенного исследования обусловлена появившимися в последнее десятилетие данными по прямым измерениям в окрестностях планет и спутников Солнечной системы магнитосфер различных небесных тел. В частности, космическим аппаратом MESSENGER впервые подробно исследована магнитосфера Меркурия, в следующем году планируется выход на орбиту Меркурия двух аппаратов BepiColombo. Первые две главы диссертации посвящены исследованию крупномасштабной структуры магнитосферы Меркурия, прежде всего формы и размеров головной ударной волны и магнитопаузы по данным КА MESSENGER.

Проблемы исследования Земной магнитосферы, и вопросы, касающиеся формирования кольцевого тока и динамики магнитных бурь, которые рассматриваются в 3 и 4 главах диссертационной работы, всегда будут оставаться ключевыми для исследований по космической физике.

Активное исследование магнитосферы спутника Юпитера Ганимеда, обтекаемого до-альвеновским потоком плазмы, стало возможным благодаря миссиям Galileo и Juno. В 5 главе рассматриваются особенности, возникающие в такой магнитосфере. Это направление актуально и для моделирования взаимодействия с потоком плазмы искусственных спутников Земли. Кроме того, Земля в целом часто попадает в сердцевину коронального выброса массы и параметры потока, могут приводить к формированию альвеновских крыльев в околоземном пространстве, как например во время сильной магнитной бури 10 мая 2024 г.

Все исследования проведенные Лаврухиным А.С. весьма актуальны и потенциально могут иметь существенное значение для прогноза космической погоды.

## **Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

По результатам диссертационной работы было сформулировано шесть выносимых на защиту положений, которые отражают сформулированные в работе задачи и описывают основные результаты, касающиеся глобальных процессов, происходящих в магнитосферах рассматриваемых небесных тел.

Для изучения основных магнитосферных границ - головной ударной волны и магнитопаузы - в диссертационной работе была выбрана миниатюрная магнитосфера Меркурия, что позволяет за относительно малое время получить представительный набор данных для всего спектра «мгновенных» состояний магнитосферы в динамическом потоке солнечного ветра. Диссертант проанализировал непрерывный ряд данных КА MESSENGER, совершившим более 4000 витков вокруг планеты, и пересекавшем на каждом витке обе поверхности. По этим данным был восстановлен характерный размер магнитосферы - расстояние до подсолнечных точек и изучена его динамика. Расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы Меркурия оказалось около 1.4 радиуса планеты, что ставит вопрос о возможности существования классического радиационного пояса у Меркурия. Для проверки такой возможности был использован метод Штермера, позволяющий рассчитать разрешенные области движения заряженных частиц в аксиально симметричной конфигурации магнитного поля. Дополнительно проводились численные расчеты траекторий частиц в модельном магнитном поле. Несмотря на то, что магнитосфера Меркурия существенно асимметрична, такой подход позволил описать условия захвата частиц в области замкнутых силовых линий.

Для изучения глобальной динамики возмущенной магнитосферы как целого и характера изменения каждой токовой системы в отдельности во время магнитной бури 26-28 февраля 2023 г. была использована параболоидная модель магнитосферы Земли. Для изучения динамики мощного кольцевого тока во время бури использовался подход Штермера в

аксиально-симметричном приближении, что является существенным упрощением, но помогает оценить критические ситуации, связанные с изменениями конфигурации движения заряженных частиц при экстремальных величинах кольцевого тока.

Для изучения эффектов, возникающих в особых случаях до-альвеновской магнитосферы изучены механизмы ускорения заряженных частиц, приводящего к формированию полярных сияний на спутнике Юпитера Ганимеде. Показано, что компенсация зарядов для поддержания тока в цепи альвеновских крыльев, может приводить к формированию скачка продольного потенциала и ускорению заряженных частиц. Возникающие пучки ускоренных электронов вызывают наблюдаемое телескопом Хаббл УФ свечение верхней атмосферы Ганимеда.

**Достоверность научных результатов.** Достоверность и актуальность полученных результатов подтверждается 6 публикациями в рецензируемых российских и зарубежных журналах, а также докладами на тематических российских и международных конференциях. При проведении работ автор использовал находящиеся в открытом доступе данные космических аппаратов, полученные результаты сопоставлялись с публикациями по той же теме в авторитетных международных журналах.

**Новизна научных результатов.** В диссертационной работе Лаврухина А.С. впервые определена зависимость от гелиоцентрического расстояния до планеты величины скачка магнитного поля при переходе через фронт головной ударной волны для магнитосферы Меркурия. При проведении данной части исследований был разработан новый метод автоматического определения пересечений магнитопаузы и головной ударной волны по данным магнитометра КА, основанный на статистическом описании временного ряда.

Для магнитосферы Меркурия была показана принципиальная возможность существования радиационных поясов. Данный аналитический результат может быть использован для оценки интенсивности захваченной

радиации и связанного с ней радиоизлучения, генерируемого в возможных магнитосферах экзопланет.

В диссертационной работе для модели магнитосферы была сделана оценка максимальной амплитуды возмущения на поверхности Земли, которое может создать кольцевой ток при экстремальных ситуациях. Для реалистичной параболоидной модели земной магнитосферы были оценены относительные вклады в возмущение на поверхности Земли различных магнитосферных токовых систем во время магнитной бури 2023 г. и рассчитана их динамика.

Лаврухин А.С. не ограничился рассмотрением классических сверхальвеновских кометообразных магнитосфер, но также рассмотрел конфигурацию и основные параметры до-альвеновской магнитосферы с характерными альвеновскими крыльями. Лаврухин А.С. показал, что в возникающей в данной магнитосфере глобальной электрической цепи может возникать недостаток носителей заряда, что является возможным драйвером возникающих на Ганиমেде авроральных свечений.

**Замечания.** С моей точки зрения автор мог бы больше внимания уделить эффектам возникновения альвеновских крыльев от космических станций, что существенно повысило бы практическую значимость работы. Однако этот недостаток скорее свидетельствует о правильно выбранном направлении исследований и говорит о пионерском подходе к решению практических проблем.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Работа оформлена согласно

требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Лаврухин А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики околоземного пространства Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)», научный сотрудник отдела физики плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук», главный научный сотрудник лаборатории геомагнитных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Геофизический центр Российской академии наук»

Пилипенко Вячеслав Анатольевич

09 сентября 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 766-26-56, e-mail: [direction@ifz.ru](mailto:direction@ifz.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена

диссертация: 01.03.03 - Физика Солнца

Адрес места работы:

123242 Москва, Б. Грузинская ул, 10, ИФЗ РАН

тел.: +7 (499) 766-26-56, e-mail: [direction@ifz.ru](mailto:direction@ifz.ru)

Подпись сотрудника ИФЗ РАН Пилипенко В.А. удостоверяю:

Зав. отд. кадров ИФЗ РАН Галаганова А.О.

09 сентября 2024 г.