

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

В работе Лаврухина А.С. изучаются явления в магнитосферах различных небесных тел – двух планет земной группы – Меркурий, Земля и одного спутника Юпитера Ганимед, обладающих собственным магнитным полем и находящихся в набегающем потоке плазмы с магнитным полем. В первых двух случаях поток солнечного ветра сверхзвуковой и сверхальвеновский, а для Ганимеда относительная скорость обгоняющей спутник плазмы магнитосферы Юпитера, которая вращается вместе с планетой, меньше альвеновской.

Наибольшее внимание уделяется изучению условий в магнитосфере Земли, но она является лишь одним из «испытательных стендов» для физических явлений, наблюдаемых в космической плазме. В магнитосферах других планет происходит множество схожих процессов, рассмотрение которых позволяет изучать процессы в околоземном пространстве с разных сторон. При этом возникает уникальная возможность изучать взаимодействие замагниченных тел с набегающей на них плазмой при различных параметрах набегающего потока. Глобальное моделирование магнитосфер в различных условиях позволяет выделить глобальные процессы, происходящие в магнитосферах, отвлекаясь от более мелкомасштабных деталей. Также, без понимания динамики магнитосферы и глобального магнитного поля невозможно правильно описать динамику

экзосфер и атмосфер планетарных тел. Среди открытых к настоящему времени тысяч экзопланет, находящихся около других звезд, преобладают, так называемые «горячие Юпитеры». Их орбиты, как правило располагаются очень близко к фотосфере родительской звезды, там, где только формируется звездный ветер. При этом магнитное поле звезды ещё очень велико и набегающий поток оказывается до-альвеновским. Описанную диссертантом магнитосферу Ганимеда с простирающимися вдоль магнитного поля до центрального тела альвеновскими крыльями можно рассматривать как некий прототип магнитосферы экзопланеты вблизи звезды с сильным магнитным полем.

В настоящий момент есть несколько подходов к моделированию магнитосфер планет, в частности все более сложные численные методы, такие как магнитогидродинамические, гибридные и кинетические методы. Их использование помогает понять природу взаимодействия потока плазмы и процесс формирования магнитосфер планет. Однако, глубокое понимание как происходящих процессов, так и результатов моделирования невозможно без аналитической глобальной модели магнитосферы. Рассматриваемые в диссертационной работе для различных небесных тел, глобальные модели магнитосферы дают возможность исследовать изменения их структуры и интенсивности.

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

На защиту вынесено 6 положений, отражающих главные цели и задачи диссертации А.С. Лаврухина и представляющих собой основные научные результаты, описывающие физические условия в космическом пространстве в окрестности планет Меркурий и Земля, а также спутника Юпитера Ганимед. Метод получения результатов основывается на анализе данных

межпланетных космических миссий и фиксации формы магнитосферных токовых систем и определения их положения, размеров и интенсивности.

Для решения поставленных задач был разработан метод фиксации скачков магнитного поля и его программная реализация, позволяющая производить автоматическое определение пересечений КА головной ударной волны и магнитопаузы по данным магнитометров космических аппаратов.

По точкам пересечений головной ударной волны и магнитопаузы Меркурия была исследована форма и изменение расстояния до подсолнечной точки головной ударной волны и магнитопаузы Меркурия по экспериментальным данным космического аппарата MESSENGER.

Анализ возможности существования радиационных поясов у планеты Меркурий, имеющей миниатюрную магнитосферу, был проведен с учетом влияния величины кольцевого тока на движение формирующих его заряженных частиц в магнитном поле магнитосферы. В диссертации был использован подход Штермера, основанный на сохранении обобщенного момента импульса в аксиально симметричном поле. Численные расчеты траекторий пробных частиц позволили адаптировать полученные результаты к магнитосферному полю и для Земли, и для Меркурия.

Для анализа механизмов, которые привели к наблюдению полярных сияний на широтах Москвы во время бури 26-28 февраля 2023 года, было использовано моделирование состояния магнитосферы при помощи параболоидной модели магнитосферы Земли с одновременным анализом данных магнитометров космических аппаратов THEMIS A, E и GOES 16, 18.

Для изучения особенностей формирования полярных сияний на спутнике Юпитера Ганимеде, находящемся в до-альвеновском потоке плазмы, были исследованы механизмы ускорения заряженных частиц, приводящих к появлению наблюдаемого космическим телескопом им. Хаббла УФ свечения разреженной атмосферы Ганимеда. При этом использовались данные по измерениям на КА параметров плазмы в окрестностях Ганимеда и теоретический подход, описывающий продольные

токи альвеновских крыльев, замыкающиеся через ионосферу Ганимеда. В отличие от планетарных магнитосфер, для которых характерно формирование протяженного хвоста ниже по потоку, альвеновские крылья ориентированы по магнитному полю потока (в данном случае по магнитному полю Юпитера). Характерные пятна свечения в месте пересечения альвеновских крыльев с ионосферой Юпитера позволяют в принципе проследить их форму на больших расстояниях – более миллиона километров.

Всё вышесказанное является достаточным обоснованием положений, выдвинутых на защиту, выводов и рекомендаций, направленных на реализацию программы дальнейших космических исследований планет и экзопланет.

Достоверность научных результатов

Научные результаты, представленные в диссертационной работе Лаврухина А.С., основаны на публично доступных данных космических аппаратов, проводивших непосредственные измерения в пространстве вокруг изучаемых небесных тел, а также на, опубликованных в рецензируемых научных журналах результатах. В работе проанализирован большой объем данных измерений. Разработанные в диссертационной работе Лаврухина А.С. методы и полученные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах из списков WoS, Scopus и RSCI, а также доложены на российских и международных конференциях.

Новизна научных результатов

В диссертационной работе Лаврухина А.С. уделяется внимание местоположению границ, разделяющих области пространства с различными параметрами плазмы и магнитного поля, и свойства как областей, так и границ как функций условий в межпланетном пространстве. В работе

впервые оценена зависимость от гелиоцентрического расстояния до планеты величины скачка магнитного поля при переходе через фронт головной ударной волны из области межпланетного пространства в область переходного слоя магнитосферы Меркурия. В последние годы возобновился интерес к роли головной ударной волны и форшока перед ней в возбуждении различных плазменных колебаний и изменении характера взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы. В диссертационной работе Лаврухина А.С. разработан метод автоматического определения пересечений магнитопаузы и головной ударной волны по данным магнитометра КА, который исключает ложные фиксации, связанные с колебаниями вектора магнитного поля в области форшока. Используя определения точек пересечения описываемых поверхностей были получены новые результаты зависимости их положения от гелиоцентрического расстояния до Меркурия, в частности для головной ударной волны на Меркурии впервые была оценена величина показателя степени этой зависимости. Также для Меркурия были рассмотрены условия во внутренней магнитосфере и показана принципиальная возможность существования радиационных поясов.

Для магнитной бури в земной магнитосфере были идентифицированы и количественно оценены, как функции условий в солнечном ветре, параметры магнитосферных токовых систем, которые формируются во время бури. Это поможет пролить свет на природу суббурь и повысит надежность прогноза их интенсивности, даёт возможность определить их относительный вклад в суммарное изменение магнитного поля на поверхности Земли. В диссертации дана интерпретация сильного расширения аврорального овала в время рассматриваемой бури и показаны причины появления полярных сияний в средних широтах. Кроме того, в более простой модели была сделана оценка максимально возможной величины возмущения в центре Земли, которое может создать кольцевой ток.

Также в работе рассматривается нестандартная ситуация для Солнечной системы – магнитосфера замагниченного тела (спутника Юпитера

Ганимеда), находящегося в потоке до-альвеновской плазмы. В результате взаимодействия головная ударная волна не формируется и силовые линии магнитного поля Ганимеда напрямую замыкаются с силовыми линиями планеты-гиганта. Диссертант исследовал и численно обосновал механизм ускорения заряженных частиц (электронов) в возникающей токовой цепи. Данный механизм приводит к формированию авроральных свечений на Ганимеде.

В заключении работы описаны дальнейшие планы диссертанта и перспективы работ по изучению магнитосфер планет и моделированию отдельных токовых систем, что даст возможность построить теоретическую обобщенную глобальную модель магнитосферы.

Замечания

1. Полученные диссертантом результаты первой главы для головной ударной волны для Меркурия по данным КА MESSENGER было бы желательно сопоставить с данными анализа более 6 тысяч пересечений головной ударной волны у Земли по данным КА Cluster и MMS, а также с наблюдениями ударных волн у немагнитных планет земной группы Венеры и Марса по данным КА Венера Экспресс (Venus Express) и MAVEN. В случае Земли эти результаты более информативны, чем данные КА MESSENGER, поскольку, во-первых, содержат информацию о скачках параметров плазмы набегающего потока и спектры частиц и, во-вторых, позволяют снять или точнее существенно снизить пространственно-временную неопределенность, поскольку обе миссии включают комплекс из нескольких платформ, помещенных в вершинах тетраэдра. Такое сопоставление увеличило бы степень общности сделанных диссертантом выводов и повысило бы их значимость для общей теории ударных волн в космической плазме.

2. Во второй главе диссертации отсутствует детальное сопоставление результатов по оценке возможности существования радиационных поясов у Меркурия с имеющимися публикациями по динамике внешнего радиационного пояса Земли на расстояниях $7 - 10 R_E$. В этой области околопланетного пространства структура дрейфовых оболочек и механизмы ускорения частиц и потерь при пересечении магнитопаузы должны быть схожи у Земли и Меркурия с учетом масштабного множителя.

3. Стр. 74. Хотелось бы рекомендовать использовать вместо "бурового кольцевого тока по сравнению с спокойным кольцевым током" термин "кольцевого тока во время геомагнитной бури по сравнению с спокойным кольцевым током".

4. Стр. 75. " Во время очень сильных бурь преобладающей становится ионная компонента O^+ [70]". Следует уточнить источник ионов атомарного кислорода - из ионосферы или ионизация атомов кислорода в горячей геокороне?

5. Стр. 80, Рис. 3.1. Лучше бы использовать одинаковый масштаб по оси X для панелей а и б рисунка, так как в настоящем виде сравнение данных панелей рисунка вводит в некоторое заблуждение.

6. Стр. 112. " Вклад кольцевого тока слегка больше вклада токового слоя хвоста, однако, согласно моделированию, именно последний дает наименьшее значение SYM-H. " Необходимо уточнить, что значит "слегка"?

7. Стр. 120. "...и будут характеризоваться максвелловским распределением с температурой в диапазоне $75-300$ эВ [112]." Чем определяется столь широкий диапазон температуры?

Кроме того, встречаются орфографические, пунктуационные и технические ошибки. Например:

1. В тексте диссертационной работы одновременно встречаются термины "альвеновский" и "альфвеновский". Хотя нет строгой регламентации, но лучше в одном тексте использовать лишь одну версию данного термина.
2. Стр. 13. Потеряно слово "близкая" в 1-ом предложении " Меркурий - наиболее к Солнцу планета...".
3. Стр. 76. Вместо "... для случая Земной магнитосферы..." обычно пишут "... для случая земной магнитосферы..."
4. Стр. 91. Потеряно слово "прийти..." в 1-ом предложении "В результате можно к выводу,..."
5. Стр.91. "можно добавить и новый механизм, описанный в статье." - имеется ввиду "... в главе."?

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. Диссертация 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.

Учитывая все вышесказанное, соискатель Лаврухин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук

Заведующий отделом Исследований Солнечной системы

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)

Шематович Валерий Иванович

03.09.2024

Контактные данные:

тел.: +7-495-951-07-30, e-mail: shematov@inasan.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

05.13.18 - теоретические основы математического моделирования

Адрес места работы:

119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48, ИНАСАН

Тел.: +7 (495) 951-54-61; e-mail: admin@inasan.ru

Подпись сотрудника Института астрономии РАН В. И. Шематовича
удостоверяю:

Ученый секретарь ИНАСАН

А. М. Фатеева

03 сентября 2024 г.