

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Климушкина Дмитрия Юрьевича «Пространственная структура и механизмы генерации азимутально-мелкомасштабных ультранизкочастотных волн в космической плазме», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

Докторская диссертация Климушкина Д.Ю. посвящена ультранизкочастотным (УНЧ) волнам в земной магнитосфере. Наиболее низкочастотные волны этого диапазона Pc3-5 являются важным фактором космической погоды. Они участвуют в ускорении частиц магнитосферной плазмы, передаче энергии солнечного ветра в сторону Земли, инициации нестационарных процессов в магнитосфере, таких как суббури. В работе исследованы механизмы генерации мелкомасштабных УНЧ волн, связанные с зацеплением альфвеновской и компрессионных волн как магнитогидродинамической, так и кинетической природы.

Актуальность исследуемых задач связана и с научной значимостью развивающихся в космической плазме неустойчивостей (взаимное обогащение физики космической и лабораторной плазмы восходит к первым работам по управляемому термоядерному синтезу и продолжается до настоящего времени), и с приложениями. Наиболее важным для практики приложением является вклад УНЧ волн в ускорение электронов до субрелятивистских и релятивистских энергий. Резкие возрастания потоков быстрых электронов вызывают сбои в работе магнитосферных спутников – от потери информации до необратимых повреждений оборудования. Кроме того, высыпания быстрых заряженных частиц модулируют ионосферу и верхнюю атмосферу. Пространственные неоднородности в ионосфере влияют на точность навигационных систем, а модуляция атмосферы является каналом

связи между космической и обычной погодой, особенно в высоких широтах. Это приводит к росту числа публикаций, посвященных поиску взаимосвязей между параметрами космической погоды и потоками быстрых заряженных частиц и созданию на их основе систем краткосрочного прогноза. Основным подходом в таких работах является учет параметров вне магнитосферы и общего уровня геомагнитной возмущенности.

Несмотря на большие усилия и применение сложных методов анализа, уровень полученных корреляций и точность прогноза не достаточны для практического применения. Это связано с принципиальным ограничением – наличием волновых процессов в магнитосферной плазме. При этом работ, дающих описание даже отдельных классов волн с достаточной для приложений точностью, мало. Диссертация Д. Ю. Климушкина заполняет этот пробел для азимутально мелкомасштабных волн в неоднородной плазме конечного давления. Именно такая плазма наблюдается во внешних областях магнитосферы. В работе выполнено исследование основных видов азимутально мелкомасштабных Pc5 и сформулированы условия в магнитосфере, необходимые для их генерации. Для различных источников получено теоретическое описание пространственной структуры волны и ее эволюции во времени. Это создает надежную базу для интерпретации наблюдаемых пульсаций, свойства которых не могут быть объяснены в рамках более простых моделей. Важность полученных результатов не исчерпывается выяснением физической природы волн в магнитосферной плазме. Полученные в диссертации решения для УНЧ волн позволяют определить параметры магнитосферной плазмы, существенные для задач мониторинга, и оценить возможность краткосрочного прогноза ускорения и потерь быстрых заряженных частиц.

Обычно УНЧ-волны в магнитосфере отождествляются с МГД модами. Но во многих случаях нельзя ограничиваться гидродинамическим приближением: необходим учет кинетических эффектов. Кроме того,

полноценная теория должна учитывать кривизну силовых линий, неоднородность магнитосферной плазмы и включать в себя механизмы возбуждения УНЧ колебаний. В диссертации теоретически исследована пространственно-временная структура УНЧ волн с учетом основных геофизических факторов. Часть эффектов изучена в реалистичных квазидипольных моделях магнитосферы. Другие, особенно при использовании кинетического описания, изучаются в упрощенных моделях.

Хотя главным объектом исследования является магнитосфера Земли, исследуемые процессы актуальны для магнитосфер других планет и для солнечной плазмы. Так процессы в многокомпонентной плазме рассмотрены для магнитосферы Меркурия, а баллонная неустойчивость – для солнечной короны.

Следует отметить высокое методическое качество диссертации. Практически для всех решенных задач кроме математического решения приводится качественный анализ полученных результатов, доступный широкому кругу специалистов и студентам.

Структура работы соответствует поставленным задачам. Отдельные главы посвящены механизмам генерации мелкомасштабных УНЧ волн, эффектам зацепления альфвеновских и компрессионных волн магнито-гидродинамической и кинетической природы и условиям возникновения резонаторов для компрессионных волн.

Введение, основанное на работах, посвященных теории и наблюдениям УНЧ волн, дает ясное и четкое изложение основных результатов теоретических экспериментальных работ в этой области магнитосферной физики.

Глава 1 посвящена пространственной структуре и источникам азимутально-мелкомасштабных альфвеновских волн в магнитосфере. Рассматриваются различные механизмы генерации волн: кинетические

неустойчивости, возбуждение волновым пакетом конечной длительности и внезапным импульсом, локализованным поперек магнитных оболочек. Разработана теория генерации волн движущимся источником, например, облаком заряженных частиц, инжектированным в магнитосферу во время суббури, или неоднородностью кольцевого тока. Возможность существования такого источника была рассмотрена в ИСЗФ (тогда СиБИЗМИР) в середине 70-х годов прошлого века. В диссертации автор вернулся к этой проблеме и получил решение в достаточно реалистичной модели. В диссертации учитывается неоднородность магнитосферной плазмы в рамках одномерно-либо двумерно-неоднородных моделей.

Наиболее важным результатом главы являются характеристики пространственного распределения и временной эволюции волны для разных типов источников, включая движущийся, моделирующих реально встречающиеся в магнитосфере процессы генерации.

Глава 2 посвящена, главным образом, изучению УНЧ-волн в плазме конечного давления с учетом кривизны силовых линий. В этом случае поле колебаний представляет собой сцепленные альфвеновские и медленные магнитозвуковые волны. Автор начал изучение этого вопроса при подготовке кандидатской диссертации, а в последующие годы получил ряд новых результатов, вошедших в настоящую диссертацию. Особенно следует отметить теорию баллонной неустойчивости в солнечной короне. Резкое падение давления плазмы, необходимое для развития этой неустойчивости, локализовано в узком диапазоне магнитных оболочек, что делает возможным существование поперечного квази-резонатора для неустойчивых мод. Изучена структура этих мод в поперечном внешнему полю направлении. Эти результаты могут оказаться весьма востребованными в физике Солнца при изучении различных нестационарных явлений.

В этой же главе рассмотрено сцепление альфвеновских и быстрых магнитозвуковых волн в магнитосфере Меркурия. Интерес к теоретическому

исследованию магнитосферы Меркурия возрос в последние годы благодаря запуску на орбиту планеты научных спутников. Плазма меркурианской магнитосферы обогащена тяжелыми ионами (натрием, выбиваемым излучением с поверхности планеты, и гелием, поступающим из солнечного ветра). В результате возникают качественные отличия в распространении волн между магнитосферами Земли и Меркурия.

К наиболее важным результатам этой главы относятся теоретические модели зацепления МГД и кинетических мод. В результате удалось описать распространение волн не только в магнитосфере Земли, но и в Солнечной короне, и в магнитосфере Меркурия. Физический анализ с выделением значимых факторов позволил в задаче с зацепленными модами получить обозримые решения.

Третья глава посвящена сцеплению альфвеновских и компрессионных мод в криволинейном магнитном поле в рамках кинетического подхода. В этом случае компрессионные моды представлены дрейфово-компрессионными и зеркально-дрейфовыми модами. Рассмотрены структура альфвеновских и компрессионных мод, условия их неустойчивости. Эти работы важны для физики магнитосферы, так как они объясняют свойства компрессионных мод с очень низкими частотами, которые участвуют в процессе ускорения электронов внешнего радиационного пояса. Свойства этих пульсаций не находят объяснения в рамках МГД.

К наиболее важным результатам этой главы относится построение теории баллонной неустойчивости в бесстолкновительной плазме. Баллонная неустойчивость неоднократно предлагалась на роль триггера магнитосферных суббурь, но ее теория обычно развивалась в рамках гидродинамического подхода. Автором было показано, что учет кинетических эффектов в бесстолкновительной плазме существенно меняет картину развития баллонной неустойчивости. Наиболее важным является механизм, связанный со сцеплением альфвеновских и дрейфово-компрессионных волн. В

частности, порог развития неустойчивости в этом случае ниже, чем в магнитной гидродинамике. Важным результатом является также разработка теории нового механизма генерации продольного электрического поля, которое вызывает ускорение авроральных электронов. Предложенный автором двухступенчатый механизм генерации продольного электрического поля оказывается значительно более эффективным, чем традиционные механизмы генерации кинетическими альфвеновскими волнами.

Наконец, в четвертой главе рассмотрена возможность существования в магнитосферной плазме структур нового типа – резонаторов для компрессионных волн кинетической природы. Необходимо отметить, что исследование резонаторов для УНЧ-волн является одним из традиционных тем работы теоретиков ИСЗФ, однако до сих пор рассматривались резонаторы либо для мелкомасштабных кинетических альфвеновских волн, либо для быстрого магнитного звука. В работах соискателя впервые рассмотрены резонаторы для дрейфово-компрессионных и зеркально-дрейфовых мод: изучены условия их формирования, пространственная структура, условия неустойчивости.

Главным результатом главы является создание модели резонатора для компрессионных мод, позволяющей описать до сих пор не имеющие адекватной интерпретации свойства пульсаций, регистрируемых в разных областях магнитосферы.

Диссертация демонстрирует уровень анализа, обеспечивающий высокую достоверность полученных результатов. Текст диссертации содержит некоторые неточности изложения, которые для удобства были разделены на три группы: вопросы и замечания по существу, неудачные обороты и опечатки. Наиболее важные приведены ниже.

## Вопросы и замечания по существу

Стр. 8. Об измерении резонансных частот и восстановлении плотности плазмы вдоль силовой линии. Здесь, кроме работ [Denton et al, 2006; Menk and Waters, 2013], надо было сослаться на пионерские работы Л.Н. Баранского с соавторами.

Стр. 13. Поляризационное расщепление возникает не из-за кривизны силовых линий, а из-за несовпадения главных кривизн поверхности ортогональной силовым линиям.

Стр. 27. После формулы (2) вместо «в альфвеновских» надо БМЗ.

Стр. 28. Стоячая волна возникает не только в случае ионосферы с достаточно высокой проводимостью (день, волновая проводимость магнитосферы меньше интегральной проводимости ионосферы), но и в плохо проводящей ионосфере (ночь, волновая проводимость магнитосферы больше интегральной проводимости ионосферы),

Лучше «не продольное волновое число», а номер гармоники.

Стр. 35 «При  $m \sim 1$  высокие гармоники Pc3-4». Это верно только для высоких широт. При  $m \sim 1$  на средних широтах Pc3-4 соответствуют первым гармоникам.

Стр. 99. Функция  $F_x(t)$  обратно пропорциональна  $t$ , а не растет как корень из  $t$ . В результате, как верно отмечено в диссертации, амплитуда колебаний и плотность энергии стремятся к постоянной величине с ростом  $t$ .

Стр. 128 п.2. Не метрического, а диэлектрической проницаемости.

Стр. 132, 133. Разложение (2.24), (2.25) вблизи  $x_0$  дает  $E_y \sim (x-x_0) \ln(x-x_0)$ , вместо (2.28) диссертации. Из (2.18) при  $k_y=0$  найдем  $E_x \sim \eta \ln(x-x_0)$ . Эти соотношения совпадают с соотношениями из [Лифшиц и Федоров, 1986] полученными при учете гиротропии и кривизны.

## **Неточности и стилистически неудачные фрагменты**

Стр. 35 и стр. 46 «поглощаются атмосферой» -> ионосферой

Стр. 46 «альфвеновский резонанс не эффективен» -> возбуждение альфвеновского резонанса БМЗ волной не эффективно

Стр. 47. «продольного магнитного поля» - > «изменения или вариаций продольного магнитного поля» ( $dB_{\parallel}/dt$  в формуле 16)

Стр. 149. по смыслу масштаб имеет размерность длины, а  $k$  – параметр типа волнового числа

Стр. 163. «Максимум амплитуды медленной моды, выраженный в терминах ...» - неудачная конструкция, скорее затуманивающая, чем проясняющая смысл

## **Опечатки**

Стр. 37 принять равной за единицу

Стр. 72 после формулы 1.40 - два раза «полоидальная поверхность»- и для максимума, и для нуля инкремента.

Стр. 86 (последний абзац) Сразу включения источника (пропущено после)

Стр. 114 должно быть экваториальным (пропущено не)

Стр. 202 Ларморовский радиус волны

Отмеченные недостатки являются в основном редакционными и не влияют на основные выводы и общий высокий уровень работы.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертация Климушкина Д.Ю. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Ее результаты опубликованы в ведущих российских и международных журналах по физике космоса, неоднократно докладывались на российских и международных конференциях, в том числе с приглашенными докладами. Диссертация соответствует всем критериям, установленным пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Лаборатории физики околоземного пространства (402)

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук»



Федоров Евгений Николаевич

«04» сентября 2024г.

Контактные данные: тел.: +7(915)459-2965, e-mail: enfedorov1@yandex.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация: 04.00.22 – геофизика

Адрес места работы: 123242, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр.1.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН),  
Лаборатория физики околоземного пространства (402) Тел.: +7-499-254-8905;  
e-mail: fedorov@ifz.ru

Подпись сотрудника ИФЗ РАН

Е. Н. Федорова удостоверяю:

Ученый секретарь ИФЗ РАН



Лиходеев Д. В.