

ОТЗЫВ

официального оппонента Ширапова Дашадондока Шагдаровича на диссертационную работу 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».

Диссертация начинается с **общей характеристики работы**, где обосновывается её актуальность, определяется цель работы, отмечаются научная новизна, научная и практическая значимость. Определяются достоверность, личный вклад, а также приводятся научные положения, выносимые на защиту и апробация полученных результатов, список публикаций диссертанта.

Актуальность темы диссертационной работы. Известно, что одним из известных явлений ближнего космоса являются геомагнитные пульсации или ультранизкочастотные (УНЧ) волны. Также известно, что источниками генерации этих волн являются внешние по отношению к магнитосфере и внутри магнитосферные механизмы, связанные с взаимодействием магнитосферы с солнечным ветром. В зависимости от механизма генерации УНЧ-волны делятся на две основные группы: азимутально-крупномасштабные и азимутально-мелкомасштабные.

В то же время, несмотря на множество исследований, проводимых в разных странах по данному направлению давно, тема диссертационной работы остается актуальной, потому что она направлена на дальнейшее развитие теории УНЧ-волн, позволяющей значительно улучшить решение следующих задач ближнего космоса:

1. Прогноза космической погоды, имеющей большое прикладное значение, например, для своевременной защиты радиотехнических систем, находящихся на космических аппаратах;
2. Исследования областей космического пространства недоступных для прямого измерения, необходимых параметров;
3. Определения различных параметров космической плазмы на основе знания ее пространственно-временной структуры и механизмов генерации.

Поэтому актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование УНЧ-волн, используя магнитогидродинамический и кинетический подходы для аксиально

симметричной модели магнитосферы при конечном давлении анизотропной плазмы с учетом взаимодействия волна-частица. При этом были поставлены следующие задачи:

1. Теоретически исследовать пространственно-временную структуру альфвеновских волн с учетом неустойчивости за счет взаимодействия «волна-частица» при учете кривизны силовых линий и конечного давления плазмы, считая что волны генерированы монохроматическим и импульсным источниками.

2. Определить полную пространственную структуру волнового поля стоячих азимутально-мелкомасштабных альфвеновских колебаний, генерированных нестационарными источниками разного типа: источником конечной длительности, широко распределенным по радиальной координате, внезапным импульсом, локализованным на отдельной магнитной оболочке, и источником, движущимся по азимутальной координате.

3. Изучить влияние на пространственную структуру стоячих медленных магнитозвуковых волн сцепления с альфвеновской модой в модели плазмы, учитывающей кривизну силовых линий и неоднородность плазмы. Применить полученные результаты для изучения устойчивости корональных арок на Солнце относительно гофрированных колебаний.

4. Изучить сцепление альфвеновских и быстрых магнитозвуковых волн в магнитосфере, обогащенной тяжелыми ионами. Применить полученные результаты к магнитосфере Меркурия, плазма которой обогащена ионами натрия, выбиваемыми с поверхности планеты солнечным излучением. Выяснить природу резонансных колебаний в магнитосфере Меркурия.

5. Изучить сцепление альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод в рамках гирокинетики в цилиндрической модели магнитосферы. Исследовать неустойчивости сцепленных мод за счет взаимодействия волна-частица, рассмотреть пространственную структуру этих мод. Изучить условия кинетического аналога баллонной неустойчивости, возникающей при сцеплении альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод. Наблюдательными проявлениями в земной магнитосфере дрейфово-компрессионных мод могут являться буревые компрессионные волны типа Pc5, регулярно наблюдаемые с помощью спутников и радаров.

6. Изучить сцепление альфвеновских и зеркально-дрейфовых мод в рамках гирокинетики, возникающих в бесстолкновительной плазме при учете анизотропии тензора давления в одномерно-неоднородной модели магнитосферы. Исследовать условия плазменных неустойчивостей, имеющих место при сцеплении этих мод.

Наблюдательными проявлениями зеркальнодрейфовых мод могут являться как штормовые компрессионные волны типа Pc5 в магнитосфере Земли, так и некоторые разновидности волн в переходном слое.

7. Изучить возможность существования в магнитосфере резонаторов для компрессионных мод кинетической природы (дрейфово-компрессионных и зеркально-дрейфовых мод). В таких резонаторах волновая энергия распространяется только вдоль азимута, будучи замкнутой поперек магнитных оболочек и вдоль силовых линий.

Научная новизна работы.

В диссертации получены ряд существенных новых результатов.

1. Впервые, исследованы кинетические неустойчивости, генерирующие азимутально-мелкомасштабные альфеновские волны с учетом структуры волнового поля, генерированных неустойчивостью и получен новый результат: из-за трансформации волны из полоидальной в тороидальную наиболее усиленными оказываются не полоидальные, а тороидальные альфеновские колебания. Известно что, эта трансформация может быть обусловлена двумя факторами: поляризационным расщеплением спектра из-за кривизны силовых линий и разбеганием начального возмущения по фазам. Большая роль кинетических неустойчивостей в генерации полоидальных колебаний подтверждается экспериментом. Это позволяет сделать важный вывод, что основная часть наблюдаемых полоидальных колебаний являются модами поперечного альфеновского резонатора, возникновение которого связано с кривизной силовых линий и конечным плазменным давлением. Для резонаторных мод трансформация из полоидальной в тороидальную моду не должна иметь место.

2. Впервые изучено становление пространственной структуры полоидальных альфеновских волн, когда одновременно имеют место разные виды трансформации из полоидальной в тороидальную моду, обусловленные различными факторами: поляризационным расщеплением спектра и разбеганием по фазам. Впервые изучена пространственно-временная структура альфеновских волн, генерированных импульсом поверхностного тока на границе магнитосферы, который возникает при резком сжатии магнитосферы импульсом давления солнечного ветра.

3. При изучении медленных магнитозвуковых волн в магнитосфере основной упор обычно делался на их структуру вдоль силовых линий. Поперечная структура медленных магнитозвуковых волн исследована только в рамках простейших среды. В работе была исследована структура в рамках реалистичных моделей, учитывающих кривизну силовых линий. Поперечная дисперсия медленных магнитозвуковых волн

вызвана сцеплением с альфвеновской модой. Результаты этого исследования были приложены для анализа неустойчивости сцепленных мод в плазме конечного давления. В качестве примера была избрана гофрировочная неустойчивость корональных арок на Солнце, поскольку для ее изучения можно ограничиться простой моделью с постоянной кривизной силовых линий. Были получены условия неустойчивости, рассмотрена структура неустойчивых мод поперек магнитных оболочек. Кроме того, было впервые изучено сцепление альфвеновской и быстрой магнитозвуковой мод в плазме магнитосферы Меркурия, обусловленное наличием в ней тяжелых ионов. Впервые получено резонансное условие для меркурианской магнитосферы, аналогичное условию альфвеновского резонанса в земной магнитосфере.

4. Систематического изучения влияния сцепления альфвеновской и дрейфово-компрессионных мод на их пространственную структуру и условия неустойчивости до сих пор не производилось. В работе показано, что одним из следствий такого сцепления является кинетический аналог баллонной неустойчивости. Определены условия развития этой неустойчивости, показаны ее отличия от гидродинамической баллонной неустойчивости. Сцепление альфвеновских и зеркально-дрейфовых мод до сих пор изучалось только на конкретных примерах. В работе показано, что следствием этого сцепления является возникновение новых мод колебаний, частота которых имеет реальную и мнимую части, и которые при определенных условиях могут раскачиваться из-за неустойчивости.

5. Важным следствием сцепления альфвеновской моды с компрессионной в неоднородной плазме является появление параллельного электрического поля, значительно более сильного, чем в однородной плазме. Обычно появление у альфвеновской волны параллельного электрического поля изучается посредством уравнения квазинейтральности плазмы, в котором есть два слагаемых: одно связано с поперечным электрическим полем волны, имеющим вихревую природу, и второе – с электростатическим потенциальным полем. Первое слагаемое ассоциируется с альфвеновской волной, второе приводит к появлению параллельного электрического поля. В нашем подходе в уравнении квазинейтральности появляется еще одно, третье слагаемое, отвечающее за продольное магнитное поле волны. Это слагаемое обусловлено сцеплением альфвеновской моды с компрессионной.

6. В работе предложена новая концепция резонаторов поперек силовых линий для компрессионных мод кинетической природы. До сих пор изучались только резонаторы ультранизкочастотных мод других типов: быстрой магнитозвуковой и альфвеновских

мод. Однако резонаторы для кинетических компрессионных мод могут иметь очень большое значение, поскольку с такими модами может ассоциироваться важная разновидность УНЧ волн в магнитосфере: буревые компрессионные пульсации типа Pc5, которые могут отвечать на ускорение частиц радиационных поясов и некоторые виды авроральных явлений.

Научная и практическая значимость. Научная ценность диссертации определяется тем, что в ней в рамках МГД и кинетического приближения построена теория УНЧ волн в моделях магнитосферы с учетом таких факторов, как конечное давление неоднородной плазмы, кривизна силовых линий и взаимодействие волн и частиц. В рамках этой модели исследованы моды УНЧ колебаний, которые могут вносить значительный вклад в общее волновое поле магнитосферы: альфвеновские волны, быстрый и медленный магнитный звук, дрейфово-компрессионные и зеркально-дрейфовые моды.

Практическое значение работы заключается в том, что полученные в ней результаты могут быть использованы в целях прогноза космической погоды. Так как, УНЧ-волны разных типов могут ускорять частицы космической плазмы до высоких энергий, которые могут представлять опасность для космических аппаратов. Кроме того, сами УНЧ-волны могут служить индикаторами активных процессов в магнитосфере Земли. Тем самым, они представляют интерес с точки зрения разработки методов диагностики околоземного космоса.

Поскольку постановка задачи для изучения волновых процессов во внешних слоях солнечной атмосферы очень близка к постановке задачи при исследовании УНЧ колебаний земной магнитосферы, некоторые результаты диссертации могут быть использованы и в физике Солнца.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обусловлена использованием корректных математических методов результаты, которых согласуются с предыдущими исследованиями. Полученные в диссертации результаты, в основном, подтверждают экспериментальные данные. Все результаты, полученные в диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах.

Личный вклад автора. Личный вклад диссертанта не вызывает сомнений.

Апробация работы. Основные результаты диссертации представлялись на семинарах ИСЗФ СО РАН и ИФЗ РАН, а также на ряде российских и международных научных конференций, а том числе:

- Международный семинар «Низкочастотные волновые процессы в космической плазме», Звенигород, 2007;
- Школа-конференция «Проблемы геокосмоса», Санкт-Петербург, 2004, 2016, 2021 гг.;
- Всероссийская конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, 2016 и 2020 гг.;
- Международный семинар «50 лет теории резонансного сцепления мод», Япония, Фукуока, 2011 г.;
- Международная конференция «Динамические процессы в космической и астрофизической плазмах», Израиль, Иерусалим, 2012 г.;
- Международные конференции по суббурям: Германия, Люнебург, 2012 г.; Тромсё, Норвегия, 2019 г.;
- Международная конференция «Жизнь со звездой», Иркутск, 2013 г.;
- Международная конференция «Магнитосферные взаимодействия на дневной стороне», Китай, Ченду, 2017 г.;
- Международная конференция «Низкочастотные волны в космической плазме», Корея, Чеджу, 2014 г.;
- Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза, Австрия, Вена, 2018 г.;
- Объединенная научная ассамблея Международной ассоциации по геомагнетизму и аэрономии и Международной ассоциации сейсмологии, Индия, 2021 г.
- Международная конференция «Достижения в понимании альфеновских волн в гелиосфере», Германия, Берлин, 2023 г.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Определена пространственная структура и эволюция во времени альфеновских волн, генерированных плазменными неустойчивостями при взаимодействии волна-частица, с учетом нестационарности источника, конечного давления плазмы, кривизны силовых линий.

2. Установлена пространственно-временная структура поля альфеновских колебаний, генерированных нестационарными источниками различного типа:

квазимонохроматический волновой пакет конечной длительности, импульс поверхностного тока на магнитопаузе, движущаяся неоднородность кольцевого тока.

3. Выявлена пространственная структура сцепленных альфвеновских и компрессионных волн в рамках магнитной гидродинамики в близких реалистичным моделях магнитного поля.

4. Определены пространственные структуры и условия неустойчивости сцепленных альфвеновских и компрессионных (зеркально-дрейфовых и дрейфово-компрессионных) волн в рамках кинетического подхода с учетом поперечной неоднородности плазмы, кривизны силовых линий и взаимодействия волна-частица.

5. Обоснована возможность существования в космической плазме резонаторов поперек силовых линий для зеркально-дрейфовых и дрейфово-компрессионных мод, где поперечная дисперсия обусловлена сцеплением с альфвеновской модой или конечным ларморовским радиусом.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК для публикаций результатов диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 257 страниц, включая 60 рисунков. Список литературы содержит 316 наименований.

Во **введении** содержится основные сведения об УНЧ-волнах, модах гидромагнитных колебаний, также приводится современная классификация наблюдаемых в магнитосфере УНЧ-волн (тороидальные, полоидальные, компрессионные). Подчеркивается значимость разделения УНЧ-волн на азимутально-крупномасштабные ($m \sim 1$) и азимутально-мелкомасштабные ($m \gg 1$). Отмечается, что трансформация альфвеновских волн из полоидальных в тороидальные связаны с поляризационным расщеплением спектра из-за кривизны силовых линий и разбеганием по фазам.

Дан краткий обзор различных видов азимутально-мелкомасштабных волн с механизмами их генерации. Отмечаются неустойчивости способные генерировать различные типы волн при $m \gg 1$ с выделением двух типов волн: первый - полоидально-поляризованные волны типа Pc4, второй - стоячая вдоль магнитной силовой линии волна между магнитосопряженными точками ионосферы. Отмечается, что такие волны

могут генерироваться при резонансном взаимодействии с высокоэнергичными частицами благодаря неустойчивостям, связанным с инверсией распределения частиц и резкими пространственными градиентами функции распределения. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие каждый из перечисленных механизмов.

Отмечается, что второй тип азимутально-мелкомасштабных волн относится к компрессионным пульсациям типа Pc5, генерируемые во время суббурь и бурь. Также отмечается, что к азимутально-мелкомасштабным волнам могут быть отнесены пульсации типа Pi2.

Замечание по введению.

На стр. 27, в четвертой строке снизу, слово распространяется написано с ошибкой.

Первая глава посвящена исследованию пространственной структуры и развитию во времени альфвеновских волн, имеющих разные источники. Неоднократно высказывалось предположение, что азимутально-мелкомасштабные альфвеновские волны генерируются неустойчивыми популяциями дрейфующих в магнитосфере высокоэнергичных частиц. Аргументом в пользу этой точки зрения считается полоидальная поляризация этих волн. Действительно, для полоидально-поляризованных альфвеновских волн характерна большая азимутальная компонента электрического поля, благодаря которой осуществляется обмен энергией между волной и дрейфующей частицей. Однако при этом не рассматривалась пространственная структура и эволюция во времени возникающих колебаний. Детально изучены вопросы возбуждения альфвеновских волн с учетом кривизны магнитных силовых линий и конечности плазменного давления с двумя типами источников: монохроматическим и импульсно-генерированными.

Диссертантом подтверждено, что инкремент неустойчивости максимален для полоидально-поляризованных волн и равен нулю для волн с тороидальной поляризацией. Также установлено, что в обоих случаях неустойчивость порождает тороидальную волну.

Поставлены и решены 2 задачи исследования пространственно-временной структуры альфвеновских волн, генерированных двумя источниками: 1) импульсом конечной длительности широко распределенного поперек L-оболочек, 2) резким импульсом сконцентрированным на одной L-оболочке.

Первая задача направлена на исследование структуры монохроматической альфвеновской волны. Показано, что развитие волнового поля можно разделить на фазы. На первой фазе, после включения источника, развитие волны наблюдается как

разбегание по фазам. При прохождении фронта через *некоторую точку* амплитуда волны резко возрастает. При этом в точках, куда фронт не дошел, продолжается эволюция волнового поля, определяемая разбеганием по фазам. После прохождения волнового фронта некоторой точки в ней формируется почти монохроматическая волна. При выключении источника возникает новый волновой фронт, который уносит волновую структуру, характерную для монохроматической волны и амплитуда волны резко уменьшается, а развитие волнового поля снова начинает определяться разбеганием по фазам.

Вторая задача связана с генерацией альфвеновских волн импульсом давления солнечного ветра, который эквивалентен импульсу поверхностного тока Чепмена-Ферраро на магнитопаузе. Сразу после импульса в магнитном поле волны присутствуют полоидальные и тороидальные компоненты. Амплитуда волны уменьшается по экспоненте с расстоянием от источника. При этом полоидальная составляющая колеблется в режиме биения. Из-за разбегания по фазам ее амплитуда уменьшается со временем, в то время как амплитуда тороидальной составляющей растет и в ней биение выражено менее заметно. Со временем волновое поле делится на тонкое ядро и широкий хвост колебания. Плотность энергии вблизи магнитной оболочки источника растет и вдали от источника значительно уменьшается, достигая небольшого постоянного значения. Постепенно на поверхности источника формируется альфвеновская волна с частотой сравнимой с локальной альфвеновской частоте на этой поверхности. В хвосте волнового поля каждая силовая линия колеблется с локальной альфвеновской частотой на своей магнитной оболочке.

В этой же главе исследована генерация альфвеновской волны облаком движущихся плазмы, которое может образоваться при суббуревых инъекциях заряженных частиц. Показана, что волна появляется в данной точке сразу после прохождения облака плазмы и направление распространения волны по азимуту совпадает с направлением движения источника. Поляризация волны сразу после прохождения облака является полоидальной и по мере удаления источника от заданной точки волна постепенно преобразовывается в тороидальную. На основе, полученных результатов предложен механизм способствующий интерпретацию экспериментальных данных о полоидальных волнах типов Pc4 и Pc5, включая экваториальное распространение фазы полоидальных волн с $m \gg 1$, постоянно наблюдающихся по измерениям на радарх.

Замечание по главе.

1. В первой главе затрудняет чтение формул (1.3), (1.8), (1.10) и (1.25) введенное новое обозначение, суть которого раскрывается только во второй главе на стр. 125 при написании формулы (2.5). Например, формула (1.3) написана в виде $\partial_1 \ln B_0 = \frac{\sqrt{g_1}}{R}$, вместо $\frac{\partial}{\partial x^1} \ln B_0 = \frac{\sqrt{g_1}}{R}$.

2. На рисунке 14 нет указанной в подписях пунктирной линии.

3. Теория движущегося источника, изложенная в работе, может объяснить только происхождение главной гармоники полоидальных альфвеновских волн в магнитосфере, где магнитное поле возмущения симметрично относительно экватора. Однако регулярно наблюдается и вторая гармоника полоидальных альфвеновских волн, антисимметричная относительно экватора. Происхождение этой гармоники в рамках теории движущегося источника остается неясным.

Во второй главе в рамках гидродинамического описания плазмы изучается сцепление альфвеновской и компрессионной мод. В роли компрессионных мод в МГД рассматриваются быстрый и медленный магнитные звуки. Физически процесс быстрого магнитного звука, генерированный при взаимодействии с солнечным ветром вблизи магнитопаузы, распространяется внутрь магнитосферы и отражается от некоторой предельной магнитной оболочки. Часть энергии быстрого магнитного звука просачивается внутрь магнитосферы и доходит до резонансной поверхности – магнитной оболочки, где частота колебаний равна собственной частоте альфвеновской волны. Около резонансной поверхности возбуждается тороидально-поляризованная альфвеновская волна.

При исследовании структуры медленной магнитозвуковой моды сцепленной с альфвеновской модой из-за кривизны силовых линий установлено, что медленный магнитный звук распространяется поперек магнитных оболочек, вследствие запертости между двумя магнитными оболочками на одной из которых происходит резонанс, на второй – отсечка. При этом на поверхностях магнитных оболочек радиальная составляющая волнового вектора стремится к бесконечности и к нулю, соответственно. Также показано, что поверхность резонанса находится дальше от Земли, чем поверхность отсечки. При этом из-за малости скорости звука вблизи экватора резонансная частота медленного магнитного звука намного ниже, чем у альфвеновской моды. Максимум амплитуды медленной моды сосредоточен вблизи экватора. Отмечено, что в магнитосфере Земли медленный магнитный звук претендует на роль компрессионных буревых колебаний типа Pc5.

Замечание по главе.

1. Во второй главе начиная с формулы (2.6) использовано непривычное обозначение

$$\partial_2 \frac{g_3}{\sqrt{g}} \partial_2 \equiv \frac{\partial}{\partial x^2} \frac{g_3}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^2} \equiv \frac{\partial^2}{\partial (x^2)^2} \frac{g_3}{\sqrt{g}},$$

которое видимо, вызвано с неудобствами, связанными верхними индексами координатных составляющих.

В третьей главе исследовано сцепления альфвеновской и компрессионной мод в рамках кинетической теории описания плазмы. При этом предполагается, что параллельное электрическое поле стремится к нулю из-за содержания в плазме малой примеси холодных электронов. Следствием этого является, что мода, связанная с медленным магнитным звуком (ММЗ) не может существовать. В то же время могут существовать другие колебания компрессионного характера, имеющие зеркально-дрейфовые и дрейфово-компрессионные моды, которые сцеплены с альфвеновской за счет неоднородностей плазмы и магнитного поля.

В главе изучена пространственная структура сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод в приближении цилиндрической модели магнитосферы, позволяющей учитывать кривизну линии магнитного поля и неоднородность плазмы и магнитного поля поперек магнитных оболочек, но без учета неоднородности поля вдоль силовых линий. При этом найдено, что возмущение локализовано в двух областях прозрачности – альфвеновской и дрейфово-компрессионной, которые ограничены поверхностями резонанса и отсечки, в которых радиальная компонента волнового вектора обращается в бесконечность и ноль. Также определены условия неустойчивости и формулы для инкрементов сцепленных мод. Отмечено, что в альфвеновской области прозрачности неустойчивость может возникать при наличии отрицательного градиента температуры плазмы, в то время как в дрейфово-компрессионной области прозрачности увеличение температуры с радиальной координатой является необходимым условием неустойчивости.

Для сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод исследован кинетический аналог баллонной неустойчивости, учитывающий эффекты конечности плазменного давления, кривизны силовых линий и диамагнитного дрейфа.

Также рассмотрена устойчивость сцепленных альфвеновской и зеркально-дрейфовой мод с ведением параметра сцепления, который пропорционален квадрату радиального градиента давления. При этом получено и решено дисперсионное соотношение для сцепленных мод. Показано: 1) при наличии сцепления значительно изменяется частота зеркально-дрейфовой моды и зеркальная неустойчивость может

развиться при более низких значениях анизотропии плазмы, 2) сцепление с зеркально-дрейфовой модой также вызывает уменьшение частоты альфвеновской моды и приводит к неустойчивости, инкремент которой пропорционален параметру сцепления, 3) при сильном сцеплении моды сливаются и понятия альфвеновской и зеркально-дрейфовой мод утрачивают свое значение.

Диссертантом введены 2 дополнительные понятия неустойчивых и устойчивых альфвеновско-зеркальных мод: первая – неустойчива при любом значении анизотропии, вторая – всегда затухающая. Отмечено, что следствием сцепления является также поперечная дисперсия мод, которая может быть ответственна за передачу энергии поперек силовых линий.

В конце главы предложен механизм генерации параллельного электрического поля альфвеновской волны, который заключается в следующем. На 1 этапе сцепление альфвеновской волны с компрессионной модой из-за неоднородности магнитного поля и конечного давления плазмы ведет к появлению у альфвеновской волны продольного магнитного поля, на 2 этапе продольное магнитное поле создает условие для появления параллельного электрического поля из-за с электростатической моды, обусловленной условием квазинейтральности.

Замечания по главе.

1. Использованная в диссертации цилиндрическая модель не учитывает сходимости силовых линий по направлению к Земле, характерной для дипольной модели. Это отражается на характере движения частиц: в цилиндрической модели частицы свободно движутся вдоль силовых линий, в то время как в диполе они совершают баунс-движение между зеркальными точками. Неясно, как это может отразиться на полученных результатах.

В четвертой главе рассмотрена теория резонаторов для компрессионных волн кинетической природы. Известно, что наличие резонатора возможно только при существовании радиальной дисперсии, т.е. зависимости частоты волны от радиальной компоненты волнового вектора. У кинетических компрессионных мод радиальная дисперсия возникает при наличии сцепления с альфвеновской волной неоднородной плазме, также из-за эффекта конечного ларморовского радиуса ионов.

Таким образом, они обуславливают возможность существования резонатора для зеркально-дрейфовых мод. Здесь диссертантом получено волновое уравнение решение, которого позволяют описывать пространственную структуру моды и ее собственную частоту. В главе найден масштаб пространственной локализации волны, который

определяется размером неоднородности плазмы и азимутальной компонентой волнового вектора. Также показано, что часть волновой энергии "просачивается" поперек магнитных оболочек, мнимая часть частоты определяет инкремент зеркальной неустойчивости, а эффекты конечного ларморовского радиуса повышают порог зеркальной неустойчивости запертых мод.

В диссертации установлена возможность существования резонатора поперек магнитных оболочек для дрейфово-компрессионных мод, поперечная дисперсия в резонаторе обуславливается сцеплением с альфвеновской модой и подобный магнитосферный резонатор может существовать в областях с локальными экстремумами отношения плазменного давления к магнитному давлению или частоты диамагнитного дрейфа.

Диссертация написано доходчиво, грамотно минимальными неточностями, с хорошей иллюстрацией и оформлением, прослеживается четкая логика изложения, взаимосвязанность и целостность использованного материала. По каждой главе сделаны чёткие выводы.

Личный вклад соискателя. Поставленные в диссертации задачи решены лично автором или при его активном участии. Диссертантом лично получены и решены ряд уравнений, которые легли в основы полученных в диссертации результатов.

Заключение. Диссертационная работа является полностью законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. В диссертации получены много новых научных результатов, позволяющие квалифицировать их как решение задач, имеющих значительные значения для соответствующей отрасли знаний, которые в свою очередь открывают новые научные направления в областях физики плазмы и физики магнитосферы. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

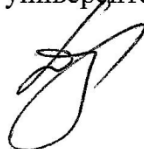
Результаты диссертации апробированы в 12 Международных и Российских научных конференция и семинарах.

Все результаты диссертации опубликованы, в виде статей, в 20 научных журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, а также в Российских научных журналах категорий K1 и K2, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций.

Автореферат соответствует тексту диссертации и достаточно полно отражает её содержание.

Диссертационная работа **«Пространственная структура и механизмы генерации азимутально-мелкомасштабных ультранизкочастотных волн в космической плазме»** отвечает всем критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней (пункты 9-14), а ее автор Климушкин Дмитрий Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Профессор кафедры «Вычислительные и радиоэлектронные системы» ФГБОУ ВО Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления,
доктор физ.-мат. наук, профессор



Д.Ш. Ширапов

27 июня 2024 г.

Сведения о лице, представившем отзыв на диссертацию

Ширапов Дашадондок Шагдарович, доктор физ.-мат. наук, профессор.

Специальность 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»

Место работы: ФГБОУ ВО Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления.

Должность: профессор

Адрес: 670013, г. Улан-Удэ, улица Ключевская, 40В, ФГБОУ ВО ВСГУТУ.

Служебный телефон: 8(3012)431415.

E-mail: office@esstu.ru

