

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Климушкина Дмитрия Юрьевича
на тему «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 Дмитрия Юрьевича Климушкина посвящена исследованию структуры и эволюции ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний и волн в космической плазме, в том числе, вопросам генерации таких волн, имеющих разную поляризацию и пространственную локализацию в зависимости от вида внешнего источника и параметров неравновесности среды.

Актуальность темы диссертации обусловлена важной ролью УНЧ волн (в магнитосфере Земли — длиннопериодных геомагнитных пульсаций) в динамике заряженных частиц и возможностями их использования для диагностики состояния среды. Как известно, такие колебания могут приводить к нарушению третьего адiabатического инварианта энергичных заряженных частиц и соответственно к их перемещению поперек дрейфовых оболочек, что сопровождается значительным изменением энергии частиц. При грамотном использовании теоретических знаний о структуре УНЧ колебаний по результатам измерений геомагнитных пульсаций в одной или нескольких точках можно получить довольно надежную информацию о распределении плазмы вдоль и поперек магнитных силовых линий. Вместе с тем, в имеющихся теоретических представлениях об УНЧ колебаниях и волнах до сих пор есть заметные пробелы. Ряд таких пробелов был ликвидирован благодаря результатам, представленным в диссертации.

Новизна полученных в диссертации результатов связана с последовательным аналитическим рассмотрением пространственной структуры магнитогидродинамических (МГД) волн и их возбуждения в достаточно реалистичной геометрии, включающей кривизну силовых линий магнитного поля, с учетом сцепления (взаимодействия) мод различной поляризации усиления волн и их возбуждения внешними источниками, с исследованием роли кинетических эффектов в структуре и возбуждении УНЧ волн, с приложением полученных результатов к процессам в магнитосфере Земли, солнечных корональных петлях и магнитосфере Меркурия.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении изложены общие сведения об УНЧ колебаниях и волнах и особенностях их структуры и механизмов возбуждения. Здесь же отмечены некоторые из оставшихся нерешенными вопросов в обоснование сформулированных в работе целей и задач.

В первой главе анализируется структура МГД волн с учетом кривизны силовых линий и эффектов возбуждения волн источниками разной природы. Одним из основных результатов этой главы, на мой взгляд, является установление того факта, что в условиях передачи энергии от неустойчивой компоненты заряженных частиц МГД волнам учет трансформации полоидальной волны в тороидальную приводит к возбуждению преимущественно последней, хотя инкремент неустойчивости максимален для полоидальной волны. Здесь же изучена генерация волн движущимся источником, моделирующим инжектированное в магнитосферу облако энергичных заряженных частиц. Показано, что расчеты дают близкие к наблюдаемым в области кольцевого тока амплитуды пульсаций Рс4–5 при задании реалистичных значений концентрации и энергии частиц.

Вторая глава посвящена анализу пространственной структуры и возможной неустойчивости компрессионных мод за счет их взаимодействия (сцепления) с альфвеновской волной. Для быстрой магнитозвуковой моды такое сцепление возникает при конечном отношении частоты к гирочастоте ионов и, в частности, при наличии в плазме доли тяжелых ионов. Для рассмотрения этой задачи выбрано приближение одномерно неоднородной плазмы с прямыми силовыми линиями магнитного поля и показано существование резонансной особенности электрического поля волны, подобной альфвеновскому резонансу. Решение качественно проанализировано для параметров плазмы, характерных для магнитосферы Меркурия с большой примесью ионов натрия.

Для медленной магнитозвуковой (ММЗ) волны сцепление с альфвеновской модой возникает за счет кривизны силовых линий магнитного поля. Задача о возможной неустойчивости таких сцепленных мод проанализирована для геометрии с постоянной кривизной силовых линий. Полученные решения могут быть применены для выяснения условий гофрировочной неустойчивости корональных петель на Солнце.

В третьей главе анализируются эффекты взаимодействия альфвеновской волны с УНЧ модами, существование которых обусловлено кинетическими эффектами. Здесь найдены условия неустойчивости альфвеновских и дрейфово-компрессионных волн, обусловленной их сцеплением друг с другом. В частности, показано суще-

ствование и определены параметры неустойчивости баллонного типа для связанных альфвеновской и дрейфово-компрессионной волн. Эта задача решена аналитически в модели с постоянной кривизной магнитных силовых линий. В этом же приближении изучено влияние взаимодействия с альфвеновской модой на свойства дрейфово-зеркальной моды. Показано, что такое сцепление мод делает условие расщепления дрейфово-зеркальной моды более мягким. Также продемонстрировано возникновение поперечной дисперсии обеих мод за счет их взаимодействия. Еще одним важным результатом этой главы является предложенный автором механизм появления продольного электрического поля в альфвеновской волне, обусловленный её сцеплением с компрессионной модой.

В четвертой главе изложены результаты исследования резонансных свойств магнитосферы по отношению к дрейфово-зеркальной и дрейфово-компрессионным модам. Анализ проведен в рамках той же модели с цилиндрической геометрией силовых линий магнитного поля, что использована в главе 3. Продемонстрировано, что резонансные свойства проявляются при учете связи этих мод с альфвеновской модой, а для дрейфово-зеркальной моды — также и при учете конечного ларморовского радиуса ионов.

Апробация результатов. Результаты работы опубликованы в двадцати статьях в авторитетных российских и международных журналах, представлены на ведущих российских и международных научных конференциях.

Достоверность полученных в диссертации результатов, помимо апробации путем их опубликования в научной печати и представления на конференциях, определяется грамотным и последовательным использованием аппарата теории плазмы, анализом физического смысла полученных результатов, сопоставлением новых результатов с опубликованными в научной литературе.

Обращает на себя внимание тот факт, что диссертация основана на работах, опубликованных ранее 2018 года. С учетом сохраняющейся высокой научной активности автора и его коллег в области тематики диссертации, это свидетельствует о научной значимости и сохранении актуальности полученных в ней результатов.

Замечания. Работа не свободна от недостатков. Начну с замечаний по существу рассмотренных в ней вопросов.

В заключительной фразе раздела 1.4.1 упоминаются инверсные функции распределения энергичных частиц, однако не поясняется, какое отношение такие распределения имеют к задаче о возбуждении волн движущимся источником, рассмотренной в этом разделе. При этом в результирующие оценки амплитуды волн входит только

концентрация, а параметры инверсии функции распределения не входят.

Сравнение с данными наблюдений в отношении магнитосферы Меркурия (раздел 2.1) проведено весьма бегло и не вполне убедительно. По сути, никакого анализа этих данных в диссертации нет, а есть лишь утверждение, что наблюдаемые резонансные УНЧ колебания попадают в диапазон ион-ионной гибридной моды. Однако ни измеренные частоты и другие свойства этих колебаний, ни теоретически определенные количественные параметры резонансных мод не приводятся, поэтому сформулированное утверждение трудно считать обоснованным.

Результаты анализа неустойчивости сцепленных альфвеновских и ММЗ колебаний даны лишь в общем виде. Их приложение к условиям солнечных корональных петель в диссертации не обсуждается, поэтому утверждение в конце главы 2 о времени развития неустойчивости менее одной минуты является декларативным.

В выводах к главе 3 содержится утверждение, что продольное электрическое поле альфвеновской волны, генерируемое за счет сцепления с компрессионной модой в неоднородной плазме с конечным давлением, значительно больше, чем продольное электрическое поля кинетической альфвеновской волны. При этом все рассмотрение проведено в приближении малых ларморовских радиусов, в то время как продольное поле в кинетических альфвеновских волнах возникает как раз за счет эффектов конечного ларморовского радиуса. Не совсем понятен смысл и методология сопоставления величин продольного электрического поля, относящихся к разным условиям его генерации и соответственно определяемым разными параметрами.

Далее приведены более мелкие замечания и вопросы, связанные с физическим содержанием текста.

с.13: вывод о том, что основная часть наблюдаемых полоидальных колебаний являются модами поперечного альфвеновского резонатора не очевиден, поскольку в сказанном выше в этом абзаце роль поперечного резонатора не обсуждается.

Здесь же — утверждение “Для резонаторных мод трансформация из полоидальной в тороидальную моду не должна иметь место” не очевидно и не следует из сказанного выше. Вообще говоря, ничто не мешает допустить существование собственных решений смешанного типа, а также существование потерь моды с одной поляризацией за счет трансформации в другую моду.

с.29: почему дрейфово-компрессионные и дрейфово-зеркальные моды “обычно рассматриваются” в пределе квазипоперечного направления волнового вектора? Есть ли для этого физические причины?

- с.30:** ω_d названо дрейфовой скоростью, но почему у этой величины размерность частоты и скоростью чего она является?
- с.57:** утверждение о монохроматической временной и пространственной зависимости всех возмущенных величин некорректно — это лишь форма собственной функции волнового уравнения в стационарной среде после отделения азимутальной переменной.
- с.59:** было бы уместно пояснить физический смысл обоих адиабатических инвариантов, особенно второго (поскольку его связь с баунс-осцилляциями частиц в приведенной форме не очевидна).
- с.61:** на самом деле, разрыва плотности на границе между ионосферой и магнитосферой нет, это только идеализация. Соответственно и разрыв электрического поля — тоже идеализация.
- с.62, строки 4–6 после (1.14):** две фразы составлены непоследовательно. Кажется бы, если ВКБ-приближение не справедливо, то в этой области условия его применимости не могут быть выполнены? Видимо, речь идет о существовании области между полоидальной и тороидальной поверхностями, в которой ВКБ-приближение все же выполняется?
- с.80, (1.59):** здесь появляется функция $g(\eta)$, не определенная ни выше, ни ниже. Её смысл так и остаётся невыясненным, поэтому непонятно, как вычисляется интеграл на с.87 (тем более, что здесь g вдруг становится функцией k).
- На с.130 сказано:** “Как видно из (2.23), в области прозрачности $x_1 < x < x_0$ волна является стоячей поперёк магнитных оболочек.” Здесь не хватает физического объяснения найденному факту.

Диссертация имеет ясную структуру, грамотно написана и в целом достаточно легко читается. Вместе с тем, есть замечания и по структуре изложения.

Положения, выносимые на защиту, не вполне отвечают этому названию. Эти формулировки суммируют полученные в диссертации результаты, но только пятое из них содержит собственно научное положение (о существовании резонаторов для зеркально-дрейфовых и дрейфово-компрессионных мод). Научные положения, вместе с тем, сформулированы в разделе “Научная новизна”. Например, для главы 1 суть одного из таких положений заключается в большем усилении не полоидальных, а

тороидальных альфвеновских колебания из-за трансформации волны из полоидальной в тороидальную (при том, что инкремент неустойчивости максимален именно для полоидальных колебаний).

Содержание вводного раздела носит характер общего введения в тематику, но в нем нет указания на конкретные задачи, решаемые в данной работе. Для меня выбранный автором вариант построения этого раздела не оптимален, и было бы уместно по ходу изложения общих вопросов физики УНЧ волн отмечать, какие из указанных нерешенных вопросов решаются в диссертации и в каких разделах это изложено.

Структура текста была бы более цельной, если бы некоторые утверждения не повторялись бы в разных главах как независимые, а упоминались бы со ссылкой на сказанное выше. В частности, это относится к утверждению о наличии резонансных поверхностей и поверхностей отсечки. Даже если речь идет о разных модах, уместно было бы отметить общность физических причин и формального описания таких особенностей. Анализируемые уравнения также было бы полезно приводить с акцентом на их отличия от уравнений, приведенных в предыдущих разделах.

Некоторые частные замечания по стилю изложения и грамматике приведены ниже.

Рис. 2 — не пояснено различие левой и правой панелей. При этом индексы в надписях трудночитаемы.

с.28 введенная здесь величина N называется волновым числом, хотя она не имеет прямого отношения к ранее определенному понятию волнового числа. Ее нужно было определить.

(1.11): не сказано, что обозначает индекс N в Φ_N .

с.114: "... что распространение фазы должно быть экваториальным." — опечатка, полярным?

с.139: Ссылка на уравнение (2.71), приведенное намного ниже по тексту, нарушает логику изложения. Видимо, здесь опечатка.

с.180: выражение "изотропная плазма" непригодно для плазмы с магнитным полем.

с.224, строки 3–4: в выражении "поля альфвеновских колебаний в моделях магнитосферы, генерированных импульсом поверхностного тока." нарушена грамматика, в результате чего модели магнитосферы генерируются импульсом тока.

В тексте встречаются опечатки (например, с.18, строка 1; с.25 строка 1; с.27 строка 4 после (2); с.59 перед (1.7); и т.д.).

Выводы. Сделанные замечания не отменяют общей высокой оценки полученных в диссертации результатов, которые составляют важный вклад автора в развитие теории УНЧ колебаний и волн в космической плазме. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертация Климушкина Дмитрия Юрьевича является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям (пп. 9–14 “Положения о присуждении ученых степеней”), а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический институт» (ПГИ),
заведующий сектором Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук им. А.В. Гапонова-Грехова» (ИПФ РАН)

Демехов Андрей Геннадьевич



03.10.2024

Контактные данные:

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

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.08 — физика плазмы

Адрес места работы:

184209, г. Апатиты, Академгородок, 26а
телефон: (81555) 76–530, e-mail: admin@pgia.ru

Подпись сотрудника ПГИ А. Г. Демехова

Ученый секретарь ПГИ




Т. А. Попова

03.10.2024