

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Власова Александра Александровича** «Исследование пространственной структуры монохроматических альфвеновских волн в магнитосфере Земли», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате»

Предметом исследования диссертационной работы Власова А.А. являются собственные альфвеновские колебания магнитосферы Земли. Если вдоль силовых линий собственные альфвеновские колебания имеют вид стоячих волн с длиной волны порядка длины силовых линий, то их поперечная структура оказывается достаточно мелкомасштабной и сильно варьируется в зависимости от области генерации и параметров самой волны. Поскольку свойства стоячих альфвеновских волн зависят от распределения параметров плазмы, их изучение важно для диагностики состояния магнитосферной плазмы. Кроме того, хорошо известно, что мелкомасштабные альфвеновские колебания являются эффективным каналом энергоснабжения в магнитосферной плазме. С развитием спутниковых наблюдений появилась возможность наблюдать подобные колебания непосредственно в магнитосфере. В результате крайне актуальной становится задача определения мелкомасштабной поперечной структуры колебаний по данным наблюдений.

При описании мелкомасштабной структуры альфвеновских волн может потребоваться учет кинетических эффектов (конечной инерции электронов и конечного ларморовского радиуса частиц), по-разному влияющих на поперечную дисперсию альфвеновских волн. Такие волны способны эффективно взаимодействовать с частицами плазмы.

**Глава 1** посвящена исследованию пространственной структуры кинетических альфвеновских волн в переходной области. Теоретическое исследование проводится в одномерно-неоднородной модели среды с прямыми силовыми линиями. Структура волн описывается уравнениями Максвелла с заданным тензором диэлектрической проницаемости, учитывающим конечную инерцию электронов и конечный ларморовский радиус частиц. Ориентируясь на типичные значения параметров среды в окрестности плазмопаузы, автор строит простую модель переходного слоя, по обе стороны которого альфвеновские волны обладают поперечной дисперсией разных типов. Несмотря на простоту этой модели, в диссертационной работе получены интересные результаты. Структура волн исследована в нескольких постановках задачи: 1) падение альфвеновской волны на переходный слой для различных конфигураций взаимного расположения границы слоя и поверхности отражения; 2) генерация волны в окрестности переходного слоя. Численное решение данных уравнений

позволило установить, что кинетические альфвеновские волны, генерируемые вблизи переходного слоя, полностью поглощаются в нем. В результате поглощённая энергия волн способна передаваться электронам фоновой плазмы с энергиями 1-5 эВ, которые ответственны за стабильные красные авроральные дуги (SAR-дуги). В соответствующем разделе дана краткая, но исчерпывающая информация о механизмах генерации SAR-дуг и получена аналитическая формула для расчёта плотности потока энергии электронов в ионосферу, формируемых при поглощении энергии кинетических альфвеновских волн, возбуждаемых широкополосными источником. Расчёты показывают, что энергии таких потоков достаточно для генерации мощных SAR-дуг.

**Во второй главе** предложен метод определения поперечной структуры альфвеновских волн (с учетом малых кинетических эффектов и без), используя набор графиков поперечных компонент магнитного (или электрического) поля и разности их фаз. Такой набор графиков назван автором «фазовым портретом» волны. В начале главы представлен обзор методов, которые используются исследователями для того, чтобы дифференцировать альфвеновские волны от других видов УНЧ колебаний. Эти косвенные методы далеко не всегда доступны и подчёркивают сложность такой задачи в современных исследованиях альфвеновских колебаний. Судя по ссылкам, в этой главе обобщается большой пласт работ, выполненных В.А. Мазуром и А.С. Леоновичем и посвященных исследованию альфвеновских волн в магнитосфере Земли. Используется двумерно-неоднородная модель с криволинейным магнитным полем, плазма при этом считается холодной. Для каждого типа волн, различающегося поляризацией, возможным источником и областью существования построены графики поперечных компонент магнитного поля, а также их разность фаз. Они действительно различаются между собой. Автором сделан вывод о возможности определения типа волн по данным наблюдений с использованием этого метода.

В качестве примера использования предложенного метода в **главе 3** приведен анализ случая наблюдения монохроматической альфвеновской волны одним из спутников миссии Van Allen Probes. Данные наблюдений сравниваются с аналитическим решением, а поведение разности фаз с теоретически полученным графиком. За основу был взят уже ранее рассмотренный случай, что является логичным шагом для того, чтобы посмотреть работоспособность метода. Интерпретация события заключается в том, что была обнаружена волна, которая, вероятно, сгенерировалась в окрестности максимума в распределении собственных частот. На это указывает модель, построенная с использованием теории, представленной в предыдущей главе. И с помощью метода, описанного в Главе 2, эту интерпретацию удалось подтвердить при сопоставлении теоретических расчётов и результатов обработки данных магнитометра со спутника.

В **Заключении** описаны основные результаты диссертационной работы. Указано, что результаты могут быть расширены на двумерно-неоднородную модель среды. Диссертант также справедливо отмечает, что представленный метод определения поперечной структуры альфвеновских волн требует дальнейшей апробации.

**Научная ценность** работы заключается в том, что автором существенно развиты теоретические модели мелкомасштабных альфвеновских колебаний в магнитосферной плазме, что, с одной стороны позволяет эффективно осуществлять диагностику плазмы по данным спутниковых измерений, а с другой стороны позволяет глубже понять механизмы энерговыведения в магнитосферной плазме.

Замечу также, что в работе **впервые** исследуется структура кинетических альфвеновских волн в переходной области в окрестности плазмопаузы, где происходит смена дисперсии волн и особенно эффективным становится взаимодействие с надтепловыми электронами, ответственными за формирование такого интересного явления как «стабильные красные авроральные дуги».

По представленной диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В первой главе используется тензор диэлектрической проницаемости в заранее заданном виде, однако не обсуждается, в каком именно приближении он получен.

2. В этой же главе возникает некоторая путаница с используемыми моделями среды. Все расчеты структуры кинетических волн выполнены в одномерно-неоднородной модели с прямыми силовыми линиями. Однако формула для оценки плотности потоков частиц уже строится в модели с дипольным полем, используемые для оценки распределения амплитуд магнитного поля получены в цилиндрической модели приэкваториальной магнитосферы. При этом во второй главе кинетические волны рассматриваются в модели среды с дипольным полем. Почему эта, более реалистичная, модель не использовалась в первой главе с самого начала?

3. Во второй главе для большинства типов колебаний приводятся решения уравнений для неустойчивых (растущих со временем) и диссипирующих (затухающих) решений. Декремент/инкремент  $\gamma$  при этом вводится в уравнения формально, при этом в работе рассматриваются предельные случаи больших и малых значений этой величины. Вероятнее всего, этот параметр может меняться в широких пределах, однако не хватает обсуждения возможных механизмов диссипации и раскачки этих волн в реальной магнитосфере, а также характерных значений этой величины в реальной среде.

4. В работе используются разные обозначения для величины разности фаз:  $\Delta\phi$  в первых двух главах и  $\Delta\Phi$  в последней главе.

Данные замечания не умаляют научную ценность работы. Важным достоинством диссертации считаю использование разработанных автором

методов для интерпретации результатов спутниковых наблюдений, что демонстрирует значительный прикладной потенциал работы. В диссертационной работе автор продемонстрировал глубокое понимание обсуждаемых вопросов, а также умение грамотно излагать материал, что тоже является достаточно важным фактором, определяющим качество работы. Сформулированные положения адекватно отражают основные результаты диссертационной работы. О высоком научном уровне выполненных исследований свидетельствует также тот факт, что все статьи по их результатам опубликованы в первоклассных научных изданиях.

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, полученные результаты вполне соответствуют поставленным задачам, её содержание соответствует специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате».

Таким образом, диссертация Власова А.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся пространственной структуры альфвеновских волн в магнитосфере Земли. Работа соответствует всем критериям, установленным пп. 9-14 "Положения о присуждении учёных степеней", и её автор Власов А.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате».

Отзыв составил Паперный Виктор Львович,  
адрес: 664003, Иркутск, К.Маркса,1; тел.+7(914)9333884; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru; место работы ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»; зав. кафедрой общей и космической физики; д.ф.-м.н., профессор.



В.Л. Паперный

5.09.2025

Ученый секретарь Совета ФГБОУ ВО ИГУ,

Курганова Н.В.

Иркутск, ул. К.Маркса, 1, (3952) 521-967, office@admin.isu.ru



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет (ФГБОУ ВО ИГУ), 664003, Иркутск, К.Маркса,1; (3952) 521-900; e-mail: office@admin.isu.ru