

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Рубцова Александра Валерьевича **«Особенности поляризации и пространственного распределения ультранизкочастотных волн в магнитосфере Земли по данным космических аппаратов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

### **Актуальность темы**

Изучение процессов, влияющих на состояние магнитосферы Земли, является важной научной и практической задачей. В частности, большой интерес представляет исследование механизмов крупномасштабного переноса энергии в магнитосфере, который, согласно современным представлениям, обеспечивается электромагнитными волнами в диапазоне ультранизких частот (УНЧ) от единиц миллигерц до единиц герц. В последние годы исследования этого механизма развиваются бурными темпами, что привело к созданию достаточно объемной теоретической картины сложного комплекса связанных с этим механизмом явлений. Следует подчеркнуть, что большой вклад в создание этой картины внесли работы научного коллектива, где была подготовлена диссертация.

С другой стороны, за последнее десятилетие был осуществлён запуск множества спутниковых миссий с целью исследования магнитосферы Земли, в том числе, ультранизкочастотных волн. Поэтому, выполненный в данной работе на основе современных теоретических моделей, детальный анализ большого массива спутниковых данных с целью выяснения механизмов генерации различных типов подобных волн, их распределения в магнитосфере, основных характеристик, а также влияния на эти характеристики макроскопической структуры магнитного поля Земли, представляется весьма актуальным.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 41 рисунок. Список цитируемой литературы состоит из 268 наименований.

**Во Введении** сформулирована актуальность темы диссертации, дан краткий обзор текущего состояния исследований ультранизкочастотных волн в магнитосфере Земли с точки зрения теории и наблюдений на космических аппаратах, указаны цели работы и решаемые задачи, отражена научная новизна и значимость данного исследования. Приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

**В Главе 1** изложены теоретические представления о магнитогидродинамических волнах в магнитосфере и кратко описаны ключевые механизмы взаимодействия ультранизкочастотных волн с заряженными частицами. Рассмотрены случаи больших и малых азимутальных волновых чисел. Отмечено, что корректное описание ультранизкочастотных волн и их взаимодействия с заряженными частицами требует кинетического подхода, в котором появляются дрейфово-компрессионные и дрейфово-зеркальные волны. Приведены дифференциальные уравнения, описывающие структуру двух типов альфвеновских волн (тороидальной и полоидальной) в разных приближениях.

Указана процедура их решения и возможность их идентификации путем сравнения полученных собственных частот с наблюдаемой частотой волны. Отмечены качественные отличия дрейфово-компрессионной волны от альфвеновской волны. Приведено условие резонанса данного типа волны с заряженными частицами и условие ее неустойчивости.

**В Главе 2** приведены основные методы обработки данных, полученных спутниками четырех различных современных миссий, применяемых для изучения УНЧ-волн в магнитосфере. В частности, описываются основные параметры вейвлет-преобразования и характеристики волновых процессов, полученные с его помощью. Отмечена возможность вычисления разности фаз волн, наблюдаемых в двух временных рядах, что, в свою очередь позволяет по разности фаз между колебаниями ортогональных компонент магнитного и электрического полей получить информацию о продольной структуре волны, а по разности фаз между колебаниями электрического поля и потоком частиц — об энергии резонансных частиц. Также описана процедура отбора волн нужного типа для статистического исследования, которая применяется для каждой компоненты магнитного поля независимо и включает в себя два основных элемента: поиск пиков частоты в спектрах и отсечку по амплитуде. Далее исходный сигнал фильтруется полосовым фильтром для выделения колебаний на частоте выделенного пика, устанавливается критерий отбора волны и в результате объединения волн, обнаруженных в разных компонентах поля в одно и то же время с близкой частотой, устанавливается доминирующее направление колебаний, которое определяет тип волны: тороидальная, полоидальная или компрессионная.

**В Главе 3** проведен анализ трех частных случаев наблюдения УНЧ-волн, в которых показано, что именно градиентная неустойчивость приводит к генерации и полоидальной альфвеновской волны и дрейфово-компрессионной волны. Рассмотрен случай регистрации полоидальной волны на дневной стороне семью спутниками различных миссий в течение уникально длительного периода ~15 ч. Объединённые наблюдения со спутников показали, что частота волны соответствует оценке собственной частоты гармоники полоидальной альфвеновской волны. Это позволило заключить, что именно градиентная неустойчивость, которая возникла на фазе восстановления магнитной бури, была источником энергии для наблюдавшейся альфвеновской волны.

Проведенный далее анализ данных, полученных с пяти спутников миссии THEMIS, находящихся в уникальной конфигурации, когда они следовали друг за другом по одной орбите с расстоянием между парой спутников от ~1000 км до нескольких радиусов Земли, позволило сделать заключение о том, что в этом случае имеет место первое прямое наблюдение дрейфово-компрессионной волны космическим аппаратом. При этом генерация волны связана с градиентной неустойчивостью из-за дрейфового резонанса с инжектированными суббурей ионами.

Статистическое исследование распределения УНЧ-волн в магнитосфере Земли с использованием данных космического аппарата Arase описано в **Главе 4**. На основе анализа результатов наблюдений нескольких тысяч волновых явлений, автор заключил, что, несмотря на различное распределение в пространстве тороидальных, полоидальных и компрессионных волн, которые обычно связывают с разными источниками генерации, распределение волн по поляризации имеет один кластер с максимумом в области смешанной поперечной поляризации, когда амплитуды колебаний в радиальном и азимутальном направлении равны.

Наконец, в **пятой главе** на основе анализа данных набора нескольких тысяч сеансов измерений из главы 4, проведен статистический анализ связи между распределением УНЧ-волн в магнитосфере и положением плазмопаузы при разном уровне геомагнитной активности. Обнаружено, что расширение плазмосферы в спокойное время смещает максимум частоты появления тороидальных и полоидальных волн от Земли, но не влияет на распределение компрессионных волн. Это позволяет сделать вывод о том, что плазмопауза ограничивает распределение волн со стороны Земли, т.е. является внутренней границей распределения поперечных УНЧ-волн в пространстве.

В **Заключении** подводятся итог всего исследования, содержится небольшое обсуждение и сформулированы основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией.

Отдельно следует отметить весьма детальный обзор, как известных теоретических моделей волновых процессов в магнитосфере, так и данных многочисленных спутниковых миссий при весьма впечатляющем объеме цитируемой автором литературы по тематике диссертации.

Полученные в диссертации результаты анализа большого объема данных наблюдений различных спутниковых миссий на основе современных теоретических моделей существенно расширяют имеющиеся в настоящее время представления о волновых процессах в магнитосфере Земли. Это, в свою очередь, позволяет продвинуться в понимании механизмов переноса энергии в магнитосфере, что имеет важное значение, как точки зрения фундаментальной физики, так и для очевидных прикладных задач.

Использование автором обширного наблюдательного материала, владение широким спектром современных методов обработки данных, тщательное обоснование полученных результатов, в том числе, путем сравнения с литературными данными, а также глубокое понимание физики волновых процессов в магнитосфере на основе современных моделей, позволяют сделать вывод о несомненной достоверности научных положений, представленных в диссертации.

О высоком научном уровне исследований свидетельствует также тот факт, что полученные результаты опубликованы только в рейтинговых международных журналах первого квартала, причем практически во всех публикациях диссертант возглавляет список авторов, часто включающий известных, в том числе зарубежных ученых. Кроме того, научная общественность ознакомлена с результатами диссертации на многочисленных российских и международных конференциях и симпозиумах.

Таким образом, являются несомненными **актуальность тематики, научная значимость, новизна работы и достоверность полученных результатов.**

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

1. Прежде всего, следует заметить, что хотя актуальность работы не вызывает сомнений, ее обоснование представляется недостаточным. В частности, утверждение автора в конце Главы 1 о недостатках существующего сопоставления теоретических представлений с наблюдениями: «...часто исследователи руководствуются самыми простыми моделями, которые используют неподходящие к реальным ситуациям приближения. В то же время теоретические модели шагнули далеко вперед, и имеет место необходимость выяснить, какие из них реализуются на практике» выглядит очень неконкретно. Следовало указать, в чем именно заключается недостаток существующих

«простых» моделей, какие «неподходящие приближения» в них используются, а также, в чем заключаются преимущества реализованных в диссертации подходов.

2. При обработке спутниковых данных автор оперирует термином «волна», однако из рис.4, 8 и др., видно, что речь идет о локализованных во времени и, соответственно, в пространстве волновых образованиях, т.е., фактически, волновых пакетах. В связи с этим, следовало оценить устойчивость такого пакета по отношению к дисперсионному расплыванию.

3. Вызывает вопросы процедура отбора волновых событий для последующего анализа, проиллюстрированная рис.4. В частности, требует пояснений критерии отбраковки участков сигнала (серая область), поскольку «не квази-синусоидальный» вид этого участка характерен также для других участков, обозначенных, например, красной и коричневой полосами. При этом амплитуда колебаний на последнем выглядит очень малой, так что непонятно, как обрабатывался этот участок сигнала.

4. Автор, наряду с общеизвестными альфвеновскими и магнитозвуковыми волнами проводит анализ также весьма специфических дрейфово-компрессионных, дрейфово-зеркальных и баллонных мод. Было бы полезно непосредственно при введении этих терминов, хотя бы кратко, описать их параметры (дисперсионное уравнение, характерный диапазон частот и др.). Это существенно облегчило бы восприятие дальнейшего материала читателем.

5. Раздел «Выводы к Главе 3» излишне детализирован и в основном, кратко пересказывает ее содержание

Указанные замечания, в основном, имеют характер рекомендаций и не снижают высокой итоговой оценки диссертационной работы, которая подтверждает достаточную научную квалификацию ее автора.

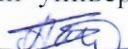
В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, поставленные цели соответствуют полученным результатам, ее содержание соответствует специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

Таким образом, диссертация Рубцова А.В. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся волновых процессов, протекающих в магнитосфере. Работа соответствует всем критериям, установленным пп. 9-14 "Положения о присуждении учёных степеней", а ее автор Рубцов А.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

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

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

