

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Челпанова Максима Алексеевича **"Пространственно-временная структура ультранизкочастотных волн, наблюдаемых в ночной ионосфере с помощью Екатеринбургского радара когерентного рассеяния"**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

### Актуальность темы

Диссертационная работа М.А. Челпанова посвящена одной из важных проблем физики околоземного космического пространства — свойствам геомагнитных пульсаций. В работе детально исследованы свойства ночных длинопериодных геомагнитных пульсаций диапазона Pc5, регистрирующиеся с помощью Екатеринбургского декаметрового радара когерентного рассеяния. Структура электромагнитных колебаний и особенности их взаимодействия с космической плазмой во многом определяются их источниками и свойствами среды распространения таких колебаний. Поэтому, как известно, геомагнитные пульсации содержат информацию о параметрах околоземной среды в области их генерации, особенностях развития магнитных бурь и магнитосферных суббурь. Однако определение типа мод волн является первым необходимым шагом к пониманию картины взаимодействия пульсаций с магнитосферой и изменений ее параметров под воздействием электромагнитных волн. Все это обуславливает очевидную актуальность темы диссертационной работы.

Существенной особенностью данной работы является использование данных среднеширотного радара когерентного рассеяния, расположенного под Екатеринбургом и находящегося под оперативным управлением ИСЗФ СО РАН. Радары объединяют преимущества как наземных магнитометров, так и спутников, поскольку они способны принимать сигнал со значительной площади ионосферы и регистрировать проявления УНЧ-волн по особенностям доплеровского смещения частоты сигнала, решая таким образом проблему экранирования ионосферой волн с большими азимутальными волновыми числами. Их использование позволяет получать дополнительные сведения об УНЧ-волнах и изучать их пространственную структуру: определять азимутальные волновые числа как в азимутальном, так и в меридиональном направлениях и направление распространения волн. Екатеринбургский радар является единственным на территории России радаром, аналогичным инструментам международной системы SuperDARN, которая на сегодняшний день показала высокую надежность результатов и используется во многих странах. Благодаря особому режиму сканирования с увеличенным временным разрешением, его можно использовать для регистрации УНЧ-волн с периодами

36 с. и выше (Pc4, Pc5). В то же время теоретические представления развиваются не столь быстро. Эти обстоятельства также подтверждают актуальность диссертационного исследования.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 93 страницы, включая 25 рисунков и три таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 154 наименований.

Во **введении** представлена актуальность темы диссертационной работы, выполнена постановка задачи, отмечается научная новизна, личный вклад автора, методы исследования, достоверность и практическая ценность полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В **первой** главе представлен обзор работ, посвященный исследованию УНЧ волн в магнитосфере. Описаны результаты современных исследований геомагнитных пульсаций, морфологические свойства и физическая природа колебаний рассмотрена согласно классификации типов пульсаций. Представлена информация об исследованиях УНЧ волн с помощью радаров.

Во **второй** главе дано описание Екатеринбургского радара, приведены особенности его работы, диапазон применимости и методы обработки получаемых с его помощью данных. Описаны критерии отбора случаев наблюдения УНЧ волн. Далее дано описание проведенной обработки длиннопериодных геомагнитных пульсаций в диапазоне 150–600 с. с помощью вейвлет-анализа. Методика дополнена примерами обработки данных. Приведен метод определения азимутального волнового числа по данным, полученным в разнесенных по долготе точках. Описан способ определения частоты стоячей альфвеновской волны на заданной магнитной оболочке по данным спутников. Представлено обсуждение точности указанного метода.

**Третья** глава посвящена результатам проведенных исследований. Для уточнения вопроса о модах УНЧ волн использован анализ 39 случаев регистрации колебаний с помощью радара. На основе сравнения частот колебаний с частотами альфвеновского резонанса соответствующих силовых линий, полученными по данным спутника, показано, что меньшая часть волн может ассоциироваться с альфвеновской модой, поскольку существенная часть колебаний имеет меньшие частоты. Кроме того, показано, что большая часть волн распространялась в направлении дрейфа энергичных протонов и сопровождала всплески авроральной активности. Диссертант сделал предположение, что колебания, или их часть, могут относиться к так называемой дрейфово-компрессионной моде.

Для отдельного случая наблюдения волны с помощью радара обнаружена зависимость частоты от азимутального волнового числа, близкая к линейной.



Указывая на то, что эта зависимость наблюдалась на фиксированной магнитной оболочке, диссертант доказывает, что данная волна являлась примером наблюдения дрейфово-компрессионной моды.

Еще в одном случае показаны одновременные наблюдения колебаний с помощью радара и пересекавшего те же магнитные оболочки спутника Van Allen Probes. Поскольку в спутниковых данных видны признаки компрессионной волны, для которой характерна частота существенно ниже альфвеновской частоты, а направление распространения совпадало с направлением дрейфа протонов, автор приходит к выводу, что наблюдаемую волну и в этом случае следует относить к дрейфово-компрессионной моде.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, обосновывается достоверность полученных результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

### **Оценка новизны и достоверности**

Наиболее важными и интересными оригинальными научными результатами диссертации можно назвать следующие:

1. Анализ интегрированных данных спутниковых измерений параметров магнитного поля и концентрации плазмы и результатов радарных наблюдений колебаний для значительного массива событий показал, что свыше 80% имеют частоты существенно ниже альфвеновских, т.е. они не могут относиться к альфвеновской моде, к которой часто принято относить наблюдаемые с помощью радаров волны с высокими значениями азимутального волнового числа. Также показано, что эти волны могут соотноситься с дрейфово-компрессионной модой.

2. Для отдельных случаев наблюдалось наличие дополнительных признаков, свойственных дрейфово-компрессионной моде, в частности, тот факт, что колебания магнитного поля находятся в противофазе с возмущениями давления частиц и потоков энергичных протонов, а также близкая к линейной зависимость частоты волны от азимутального волнового числа. Такая зависимость величин на фиксированной магнитной оболочке характерна именно для дрейфово-компрессионной моды, условия возникновения которой реализуются в магнитосфере.

Полученные в работе результаты дают возможность дополнить имеющиеся сведения о структуре геомагнитных пульсаций и внести вклад в определение механизмов их генерации. Они способствуют созданию теоретических моделей, наиболее приближенных к реальной картине физических процессов в магнитосфере.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что ее результаты могут быть использованы при интерпретации данных, полученных с искусственных спутников Земли, радарных установок, а также интегрированных данных космических и наземных наблюдений. Полученные

результаты могут быть также использованы для изучения свойств магнитосфер других планет.

**Обоснованность научных положений и выводов** обеспечивается использованием качественного наблюдательного материала, полученного на аппаратуре, являющейся стандартной для системы радаров SuperDARN, которая на сегодняшний день показала высокую надежность результатов и используется во многих странах. Используются современные методики обработки и анализа материала. Задействованные математические методы широко применяются в различных областях естественных и технических наук

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

**Автореферат полностью соответствует структуре и отражает содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.**

#### **Апробация работы**

Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных работах, из них три статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, и рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций.

**Рекомендации по внедрению результатов работы.** Представленные в диссертации результаты, могут быть использованы в ряде ведущих отечественных космофизических центров: Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Институте космических исследований РАН, Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН и др.

#### **К диссертации имеется ряд замечаний**

1. Одним из основных результатов работы является установление того факта, что большая часть магнитосферных колебаний диапазона Pc5 в обработанных сериях радарных наблюдений имеет частоту ниже альфвеновской, что расходится с принятыми представлениями о них как о стоячих альфвеновских волнах, т.е. относятся к другим модам, и по меньшей мере, часть из них следует определять как дрейфово-компрессионную моду. Автору следовало пояснить, почему этот важный результат не отмечался ранее в многочисленных работах, посвященных подобным наблюдениям.
2. Следовало обсудить общность данного результата: является ли он частным, полученным именно в данной серии измерений, в данных геофизических условиях, или он имеет универсальный характер, применим в любых условиях, для магнитосферы, в целом.
3. Непонятен смысл и неудачна подпись рис.12б и его связь с рис.12а. Подпись к рис. 20 не вполне соответствует его содержанию, а из

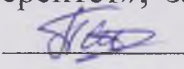


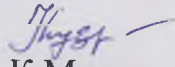
комментариев к нему неясно, как получены описанные результаты. Для этих рисунков необходимы пояснения автора.

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

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, поставленные цели соответствуют полученным результатам, ее содержание соответствует специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Таким образом, диссертация Челпанова М.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся волновых процессов, протекающих в магнитосфере. Работа соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. а ее автор Челпанов М.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

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

Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ,  
Н.Г. Кузьмина   
664003, Иркутск, ул. К.Маркса,1, (3952) 521-900, 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