

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи  
УДК 533.951



Челпанов Максим Алексеевич

**Пространственно-временная структура ультранизкочастотных волн,  
наблюдаемых в ночной ионосфере с помощью Екатеринбургского радар  
а когерентного рассеяния**

Специальность 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Иркутск — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

**Магер Павел Николаевич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

**Официальные оппоненты:**

**Паперный Виктор Львович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», заведующий кафедрой общей и космической физики

**Белаховский Владимир Борисович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», научный сотрудник

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта» Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится «    »    2020 г. в «    » часов на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского Отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского Отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



Поляков В. И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Геомагнитные пульсации всегда сопровождают возмущения магнитосферы, а также регулярно наблюдаются при спокойном состоянии околоземной космической среды. Большое количество данных, полученных на спутниках и наземных магнитометрах, используется для определения свойств ультранизкочастотных (УНЧ) волн, таких как частотные характеристики и поляризация. Изучение параметров пульсаций может дать представление об областях, в которых они генерируются и распространяются, для которых недоступны непрерывные прямые измерения. Пульсации не только переносят информацию об околоземном космическом пространстве, но и сами влияют на его состояние посредством взаимодействия с потоками заряженных частиц и переноса энергии из солнечного ветра внутрь магнитосферы и из магнитосферы в ионосферу.

Понимание механизмов возникновения пульсаций и их преобразования со временем является необходимым для использования данных о них для мониторинга процессов, протекающих в магнитосфере. Так, альфвеновский резонанс силовых линий может быть использован для определения концентрации плазмы в магнитосфере на основе наземных данных [Wharton et al., 2018]. Однако для этого прежде всего следует правильно отделять альфвеновский резонанс от прочих волновых процессов. Альфвеновские волны, имеющие в азимутальном направлении большую длину (малые азимутальные волновые числа  $m$ ), возникают благодаря, например, быстрым магнитоакустическим волнам, проникающим из солнечного ветра или формирующимся на магнитопаузе. Волны с малой длиной в азимутальном направлении (большие  $m$ ) генерируются внутренними процессами и считаются обычно полоидальными альфвеновскими модами. Тем не менее, альфвеновские моды следует отличать от группы буревых компрессионных пульсаций диапазона Pc5, которые имеют частоты ниже альфвеновских. Их природа до конца не ясна. Вероятно, их или часть из них следует связывать с дрейфово-компрессионной модой.

Использование радаров позволяет получать дополнительные сведения об УНЧ-волнах и изучать их пространственную структуру. Они принимают рассеянный сигнал с большой площади и решают проблему экранирования ионосферой волн с большими азимутальными волновыми числами, из-за которой их затруднительно регистрировать с помощью наземных магнитометров.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию свойств пульсаций диапазона Pc5, регистрирующихся с помощью единственного на территории России радара, аналогичного радарам системы SuperDARN.

Определяется соотношение волн, имеющих различную природу; рассматриваются дрейфово-компрессионные колебания, что может помочь в развитии теории дрейфово-компрессионной моды.

### **Цель работы**

Конечная цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании и определении свойств длиннопериодных геомагнитных пульсаций, которые регистрируются когерентным радаром по доплеровскому смещению частоты сигнала, рассеянного на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы. Скорость ионосферной плазмы модулируется магнитосферными УНЧ-волнами посредством дрейфа в скрещенных магнитном и электрическом полях.

В соответствии с целью решался ряд конкретных задач.

- Обработка наблюдательного материала, включающая выявление случаев регистрации УНЧ-волн, вейвлет-анализ колебаний и определение азимутальных волновых чисел. Сравнение полученной с помощью радара информации с данными спутников о параметрах магнитного поля и плазмы в магнитосфере в период регистрации колебаний.
- Исследование закономерностей распределения зарегистрированных радаром колебаний по частотам, выявление особенностей, таких, как направления распространения в азимутальном и радиальном направлениях, зависимость частоты от азимутального волнового числа; сравнение частот с частотами альфвеновского резонанса силовых линий, определенными по параметрам среды в магнитосфере.
- Определение мод зарегистрированных колебаний; оценка доли колебаний, относящихся к собственным колебаниям силовых линий и к другим модам, в частности, дрейфово-компрессионной.

### **Научная новизна**

- Впервые для отдельного случая показана близкая к линейной зависимость частоты волны от азимутального волнового числа для фиксированной магнитной оболочки. Такая зависимость свойственна дрейфово-компрессионной моде.
- Показан случай наблюдения дрейфово-компрессионной волны одновременно на спутнике и в данных радара. Отнесение волны к дрейфово-компрессионной моде основано на сравнении ее частоты с частотой резонанса силовых линий и анализе параметров волны.
- На основании ряда случаев регистрации волн, для которых были доступны данные спутников из сектора наблюдения с соответствующих магнитных оболочек, сделана оценка доли волн, которые могут быть отнесены к альфвеновскому резонансу силовых линий. Показано, что большая часть

колебаний имеет частоту ниже альфвеновской и относится к другим модам. По меньшей мере часть из них следует определять как дрейфово-компрессионную моду.

### **Научная и практическая значимость**

В работе рассмотрены случаи наблюдения дрейфово-компрессионных волн в магнитосфере и на основе радарных наблюдений проведена оценка соотношения количества волн, относящихся к различным модам. Изучение свойства геомагнитных пульсаций играет важную роль в понимании механизмов взаимодействия магнитного поля Земли с солнечным ветром, процессов, происходящих с облаками заряженных частиц, дрейфующих в магнитосфере, и состояния околоземной космической среды в целом. При этом в процессе таких исследований, затрагивающих УНЧ-колебания и использующих их как средство диагностики, определение природы волн является первостепенной задачей.

Научная ценность работы заключается в экспериментальном исследовании свойств волн, зарегистрированных радаром по доплеровскому смещению рассеянного в ионосфере сигнала, и сопоставлении их с данными спутников о параметрах плазмы и магнитного поля. Выяснено, что частоты большей части зарегистрированных колебаний существенно меньше частот альфвеновского резонанса силовых линий. Этот факт расходится с общепринятыми представлениями о волнах диапазона Pc5 с большими азимутальными волновыми числами, которые зачастую относят к альфвеновской моде [James et al., 2013, 2016]. Новые представления дают возможность дополнить имеющиеся сведения и внести вклад в определение механизмов генерации геомагнитных пульсаций. Они способствуют созданию теоретических моделей, наиболее приближенных к реальной картине физических процессов в магнитосфере. Они могут быть использованы также для изучения свойств магнитосфер других планет.

**Достоверность результатов**, представленных в данной работе, 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. Результаты, полученные в процессе работы, обсуждались на научных семинарах и были представлены на российских и международных конференциях, а также были опубликованы в рецензируемых журналах.

### **Личный вклад автора**

Автор совместно с руководителем принимал участие в постановке задачи и обсуждении результатов. Автором проводились обработка данных Екатеринбургского радара, первичный анализ, проведение расчетов, вейвлет-анализ данных. Автор разрабатывал компьютерные программы и алгоритмы, использованные в работе. Автор принимал участие в интерпретации полученных результатов, представлял материалы исследования на конференциях.

### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Международная конференция «Проблемы геокосмоса». Санкт-Петербург, 2016.
- Международная конференция **RadioSun-4 и 5 Workshop & Summer School**. Иркутск, 2015; Ческе-Будеёвице (Чехия), 2016.
- Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2017.
- 42-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений». Апатиты, 2017.
- Международная конференция «**SuperDARN Workshop 2018**», Баниёльс-сюр-Мер (Франция), 2018.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- С помощью радара когерентного рассеяния и спутниковых миссий установлено, что частоты УНЧ-волн, наблюдаемых в ночной части магнито-сферно-ионосферной системы значительно ниже частот стоячих альфвеновских колебаний на данных магнитных оболочках и не коррелируют с ними. Это противоречит общепринятой интерпретации этих волн как альфвеновских.

- Установлено, что большинство наблюдаемых волн распространялось на запад в направлении дрейфа энергичных протонов, однако небольшая их часть распространялась на восток в направлении дрейфа энергичных электронов. Полученные результаты позволяют предположить, что наблюдаемые волны с наибольшей вероятностью являются дрейфово-компрессионными волнами, частоты которых ниже альфвеновских, и которые могут генерироваться неустойчивыми распределениями энергичных протонов или электронов, находящихся в дрейфовом резонансе с волной.

- Для отдельного случая наблюдения в ночной ионосфере УНЧ-волны с частотой ниже частот стоячих альфвеновских колебаний с помощью радара когерентного рассеяния установлено, что частота волны на данной магнитной оболочке меняется и почти линейно зависит от азимутального волнового числа. Кроме того, для случая одновременного наблюдения похожей волны в ионосфере с помощью радара и магнитосфере с помощью спутника установлено, что волна является компрессионной и диамагнитной. Установленные свойства наблюдаемых волн позволяют интерпретировать их как дрейфово-компрессионные волны.

### **Публикации**

Материалы, представленные в диссертации, были опубликованы в 5 печатных работах, из них 3 работы — в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций.

### **Структура и объем диссертации**

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 157 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, описаны цели работы и решаемые задачи, отражена научная новизна, актуальность и научная значимость темы, дается обзор работ в области исследования геомагнитных пульсаций и приводятся положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященной исследованию геомагнитных пульсаций. Дана информация о методике описания магнитосферных УНЧ-волн, приведена классификация пульсаций, описаны их морфологические характеристики, особенности наблюдений, свойства и источники. Приведены сведения о радарных исследованиях УНЧ-волн.

Во **второй главе** представлены сведения об инструментах, с помощью которых были получены данные, использовавшиеся в работе. Приведены характеристики Екатеринбургского среднеширотного когерентного радара коротковолнового диапазона и режимы его работы. Описаны особенности получения данных, в том числе методы отделения сигнала, рассеянного земной поверхностью, от сигнала, рассеянного неоднородностями ионосферы. Даны характеристики инструментов спутников RBSP и THEMIS. Описана методика обработки с помощью вейвлет-анализа данных, полученных на радаре, обосновано использование вейвлета Морле. Приведен метод определения азимутального волнового числа по данным, полученным вдоль соседних лучей, а также оценка частоты стоячей альфвеновской волны на заданной магнитной оболочке по данным спутников.

Екатеринбургский радар принимает сигнал, рассеянный на мелко-масштабных неоднородностях F-слоя магнитосферы. По величине доплеровского смещения рассеянного сигнала по частоте определяется скорость ионосферной плазмы. Причиной мелко-масштабных периодических изменений скорости плазмы являются вариации  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейфа, возникающие под действием электрического поля магнитосферных УНЧ-волн [Bland et al., 2014; Ponomarenko et al., 2003; Yeoman et al., 2000; Walker et al., 1992]. Для получения данных о таких колебаниях скорости на радаре в ходе эксперимента использовался дополнительный канал со специальным режимом работы, обеспечивающим временное разрешение 18 с для трех соседних направлений сканирования, или лучей, направленных примерно вдоль магнитного меридиана. Колебания скорости плазмы в этом направлении соответствует радиальной компоненте возмущения магнитного поля. В работе использовались данные, полученные с сентября 2014 по март 2015 г. включительно. В них было обнаружено 39 случаев регистрации устойчивых колебаний. Кроме того, использовались данные спутников Van Allen Probes (RBSP) и THEMIS.



Вейвлет-анализ показал, что для части колебаний наблюдалась только одна колебательная гармоника, в то время как другие случаи характеризовались более сложной структурой колебаний: одновременно, либо близко по времени наблюдались две или три колебательные гармоники с разными частотами. Кроме того, использование комплексного вейвлета Морле позволило вычислить разность фаз сигнала на соседних лучах и азимутальные волновые числа колебаний. Также для уточнения направления распространения волн в азимутальном направлении использовался кросскорреляционный анализ.

На рис. 1 показаны скорости плазмы вдоль луча 0 для одного из случаев регистрации колебаний радаром 21 февраля 2014 г. Колебания скорости с амплитудами до 50 м/с видны в интервале геомагнитных широт протяженностью около  $2.5^\circ$  и имеют продолжительность более часа. На рис. 2 приведены отфильтрованные данные, полученные на лучах 0 и 1 для отдельного диапазона дальности от радара на геомагнитной широте  $61^\circ$ . На рис. 3 показан кросс-вейвлет-спектр для этих рядов. На нем виден ряд колебательных гармоник с частотами от 3 до 5.3 мГц. Азимутальные волновые числа в максимумах мощности колебаний были равны соответственно 4,  $-8$  и  $-30$ .

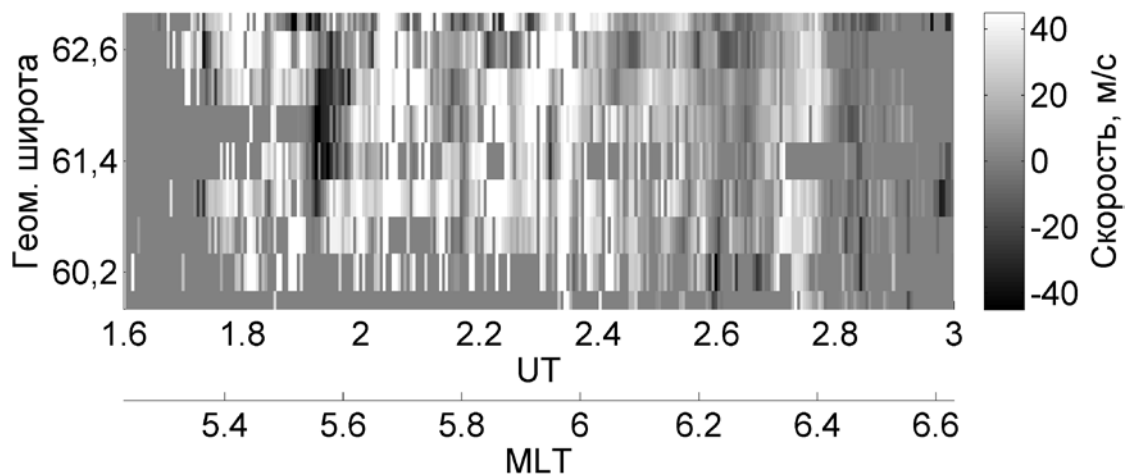


Рис. 1. Скорости ионосферной плазмы вдоль луча 0. 21 февраля 2014 г.

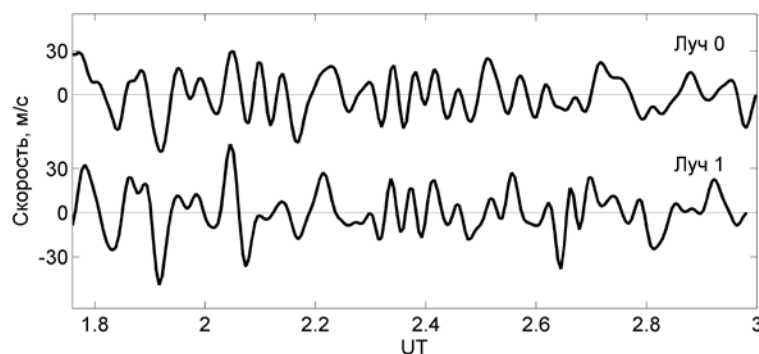


Рис. 2. Колебания скорости плазмы вдоль лучей 0 и 1 в 45-километровом диапазоне расстояний от радара, примерно соответствующих геомагнитной широте  $61^\circ$ . 21 февраля 2014 г.

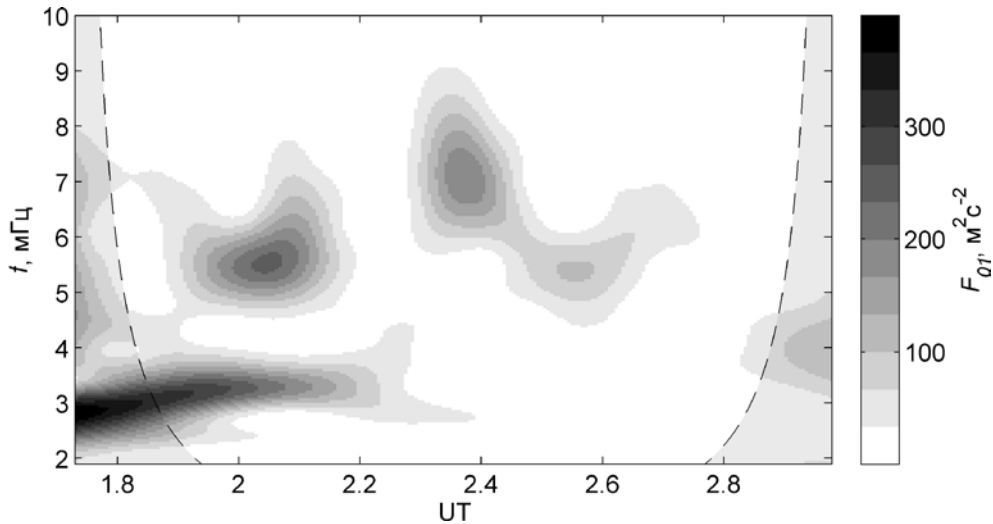


Рис. 3. Кросс-вейвлет-спектр для рядов данных, полученных вдоль лучей 0 и 1 на геомагнитной широте  $61^\circ$ . 21 февраля 2014 г.

В третьей главе приводится анализ данных об УНЧ-волнах, зарегистрированных с помощью Екатеринбургского радара в ходе эксперимента с использованием режима высокого временного разрешения. Всего было зарегистрировано 39 случаев наблюдения колебаний. Для ряда наблюдений доступны данные спутников, которые в секторе нахождения радара пересекали силовые линии, в основании которых наблюдались колебания скорости ионосферной плазмы. Спутниковые данные использовались для анализа параметров среды, в которой распространялись УНЧ-волны.

В разделе 3.1 для решения задачи об идентификации мод всего набора колебаний, наблюдаемых с помощью радара, их частоты сравнивались с частотами альфвеновских стоячих волн на тех же силовых линиях. Одним из распространенных подходов к вопросу определения мод является отношение всех наблюдающихся с помощью радаров волн диапазона Pc5 к альфвеновскому резонансу [напр. James et al., 2013; James et al., 2016]. Однако, как показано в разделе, такой подход является не вполне корректным.

Для анализа были использованы данные о 33 УНЧ-волнах. Для каждого случая было получено свое значение частоты собственных колебаний и каждому колебанию ставилось в соответствие отношение ее частоты к альфвеновской частоте, оцененной по данным спутника с использованием дипольной модели геомагнитного поля и степенного закона распределения частиц вдоль силовых линий,  $f/f_A$ . На рис. 4, а показано распределение всех волн по величине этого отношения. Из неравенства  $f/f_A < 1$  ( $f/f_A > 1$ ) следует, что частота волны меньше (больше) соответствующей частоты собственных колебаний силовой линии. Равенство этой величины единице означает совпадение частот. Такие факторы, как неточность моделей, использующихся для оценки альфвеновской частоты, некоторая разница во времени

наблюдения колебаний радаром с временем прохождения спутников через соответствующие магнитные оболочки и разнесенность спутников и радара по долготе, могут приводить к расхождению частот собственных колебаний силовых линий с ее оценочными значениями. Тем не менее, видно, что большинство колебаний не может быть отнесено к альфвеновской моде, поскольку их частоты существенно ниже. У пяти из 33 колебаний частоты относительно близки к альфвеновской, отклонение от нее не превышает 20 %. Отсюда не следует их однозначная принадлежность к альфвеновской моде, тем не менее, можно сделать вывод, что не более 15 % от наблюдаемых радаром волн относятся к ней.

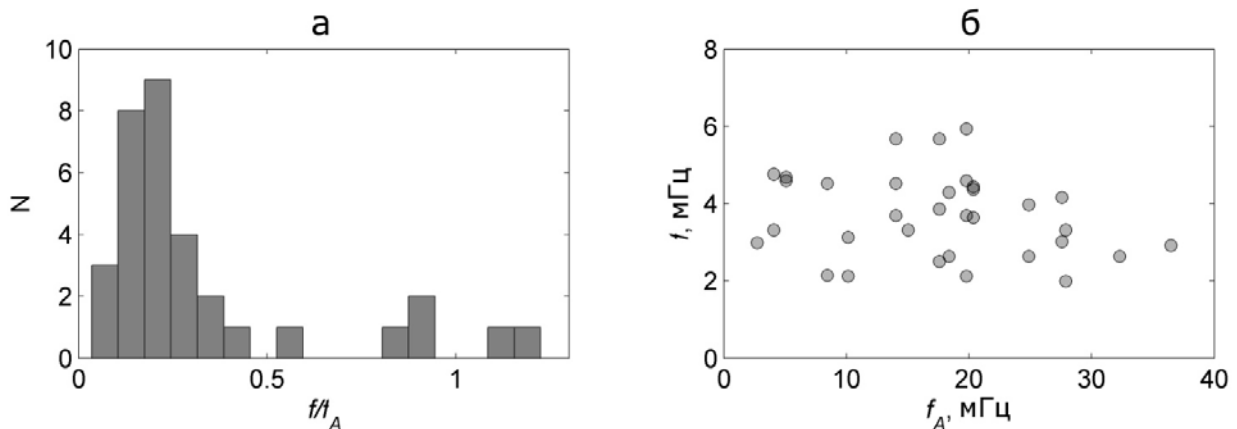


Рис. 4. Распределение частот колебательных гармоник по отношению  $f/f_A$  для 16 случаев наблюдений (а); зависимость  $f/f_A$  для этих же случаев

На рис. 4, б показана зависимость наблюдаемой радаром частоты колебаний от альфвеновской частоты, оцененной по данным спутников. Видно, что выраженная зависимость частот от  $f_A$  не наблюдается. Коэффициент корреляции низкий и равен 0.2.

**Раздел 3.2** посвящен обсуждению предполагаемых мод наблюдавшихся с помощью радара волн. В небольшой части случаев одновременно с радаром волны наблюдались в данных спутников, при этом в них присутствовал диамагнитный эффект — колебания давления частиц и напряженности магнитного поля находились в противофазе. Поскольку колебания, которые были зарегистрированы спутниками, являются компрессионными, их можно отнести к буревым компрессионным Pc5-пульсациям [Anderson et al., 1993].

В рамках теории магнитогидродинамики (МГД) буревые компрессионные пульсации с частотами ниже альфвеновских следует относить к медленному магнитному звуку (ММЗ). Однако для бесстолкновительной плазмы и низких частот следует учитывать баунс-движение частиц и потому подход МГД может быть неприменим, а вместо него следует применять кинетический подход [Hurricane et al., 1994]. Во-вторых, частота ММЗ слиш-

ком мала для приведенных случаев, она на два порядка ниже альфвеновской частоты [Leonovich, Kozlov, 2013]. В-третьих, частота ММЗ всецело определяется номером магнитной оболочки, и на заданной силовой линии может существовать волна только с одной определенной частотой. Однако в работе [James et al., 2016] показаны несколько случаев, когда облако частиц, инжектированных во время суббури, генерировало волны с существенно различающимися частотами приблизительно на одной и той же магнитной оболочке в разных долготных секторах. Это несоответствие также ставит под сомнение применимость МГД-подхода для буревых компрессионных колебаний.

Возможным объяснением несоответствия частот волн, зарегистрированных с помощью радара, частотам альфвеновских стоячих волн могло бы быть уменьшение величины альфвеновской частоты в условиях кривизны силовых линий и большого отрицательного градиента давления (баллонная мода) [Klimushkin, Mager, 2015]. Однако в случае баллонной моды, как и для ММЗ, на одной магнитной оболочке не могут существовать две волны с разными частотами.

Также частота полоидальной альфвеновской моды в плазме с конечным давлением может быть ниже, чем в холодной плазме из-за сцепления с компрессионной модой [Klimushkin et al. 2012а, б; Мазур и др., 2014]. Однако в описанных случаях  $\beta$  плазмы мал, он находится в пределах 0.001–0.1, и поэтому взаимодействие мод не должно существенно влиять на частоту.

В случае кинетического подхода часто упоминается дрейфово-зеркальная мода. Однако, стоит отметить, что для ее существования требуются условия, не типичные для магнитосферы: поперечная температура плазмы должна существенно превышать продольную, особенно при условии  $\beta < 1$ . Поэтому принадлежность рассматриваемых колебаний к этой моде маловероятна.

Из возможных видов УНЧ-волн, к которым могут относиться данные колебания, остается только один вариант — дрейфово-компрессионная мода. Это наиболее типичная компрессионная УНЧ-мода в кинетике. Для ее существования требуется конечное давление плазмы, а также неоднородность плазмы поперек магнитных оболочек. Ее частота может быть ниже альфвеновской собственной частоты [Crabtree, Chen, 2004; Klimushkin, Mager, 2011]. Характерной особенностью дрейфово-компрессионной моды является линейная зависимость частоты от азимутального волнового числа для заданной магнитной оболочки [Mager et al., 2013].

В большинстве показанных случаев волны имеют отрицательные азимутальные волновые числа, т. е. распространяются на запад в направлении дрейфа положительных ионов. Эти результаты совпадают с выводами

большого числа исследований пульсаций диапазона Pc5 с большими  $m$  и косвенно указывают на роль энергичных ионов, инжектированных во время суббурь, в генерации УНЧ-волн, что также согласуется с теорией генерации дрейфово-компрессионных волн [Crabtree and Chen, 2004; Crabtree et al., 2003; Mager et al., 2013].

В разделе 3.3 представлено исследование одного из случаев радарных наблюдений УНЧ-колебаний. Характерной особенностью зарегистрированной волны является постепенное снижение ее частоты одновременно с уменьшением азимутального волнового числа.

Колебания скорости ионосферной плазмы наблюдались в послеполуночном секторе в течение около полутора часов. Максимальные амплитуды колебаний более 200 м/с (соответствуют амплитуде колебаний электрического поля более 10 мВ/м) наблюдались около 23:00–23:30 UT. Фаза волны не менялась с ростом магнитной широты, что указывает на азимутальное распространение и отсутствие зависимости частоты от номера магнитной оболочки (рис. 5). Колебания наблюдались с помощью радара на фоне умеренно возмущенного геомагнитного поля после двухчасового периода направленного на юг межпланетного магнитного поля (ММП). Из кросс-вейвлет-спектра для рядов данных, полученных на лучах 0 и 1 (рис. 6), видно, что частота квазимонохроматической волны в течение 20 мин постепенно снижалась с  $\sim 4.5$  до 2.9 мГц, а затем увеличилась до 3.1 мГц в течение следующих 5–6 мин. Схожая частотно-временная зависимость наблюдается также в кросс-спектрах пары лучей 1 и 2. Значения волнового числа  $m$  отрицательные, что характеризует распространение фазового фронта волны на запад. Медианное значение его абсолютной величины уменьшается с 67 до 29 одновременно со снижением частоты волны, что может говорить о зависимости частоты колебаний от азимутального волнового числа. Это предположение для данного временного интервала подтверждается коэффициентом корреляции между этими величинами, равным 0.90. На рис. 7 показана зависимость частоты от волнового числа  $m$  в заданном периоде времени и диапазоне широт.

Как и в большинстве остальных случаев, наблюдения волн, описанных в разделе 3.1, в диапазоне магнитных оболочек, на которых с помощью радара наблюдались колебания, частота альфвеновской стоячей волны была в несколько раз выше частоты колебаний ионосферной плазмы: по данным спутника RBSP-B альфвеновская частота в секторе радарных наблюдений на этих оболочках была оценена в 13–23 мГц (рис. 8).

Главным результатом исследования, описанного в разделе, является выраженная зависимость частоты волны от величины азимутального волнового числа на фиксированной магнитной оболочке.

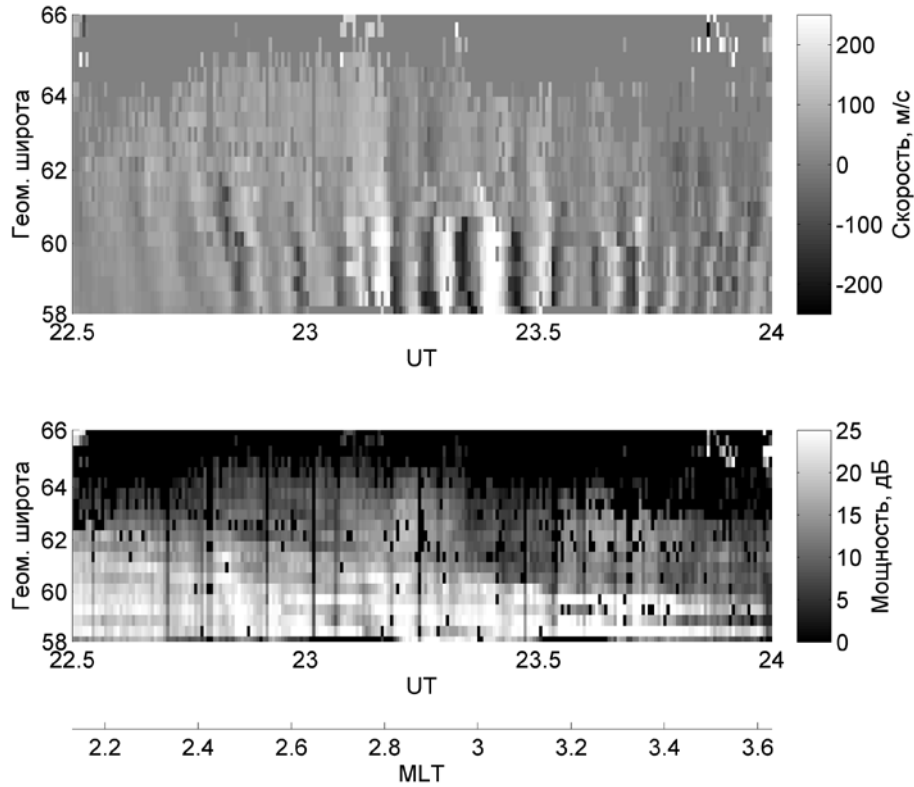


Рис. 5. Скорости плазмы вдоль луча 0 (вверху) и мощность сигнала на том же луче (внизу). 26 декабря 2014 г.

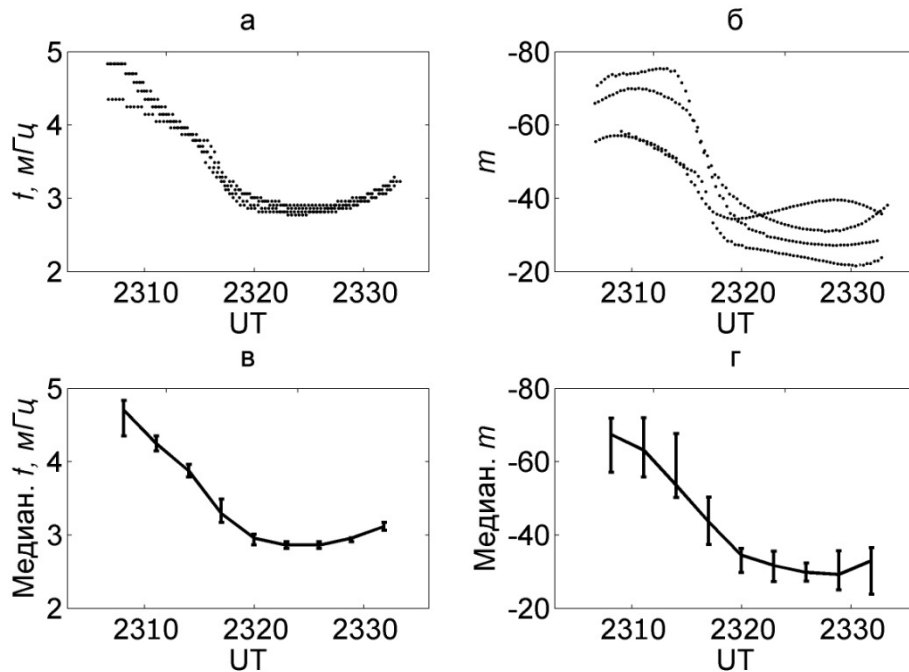


Рис. 6. Значения частоты (а) и азимутального волнового числа  $m$  (б), соответствующие максимумам кросс-вейвлет-спектров на разных геомагнитных широтах в диапазоне  $58.5\text{--}59.7^\circ$  и их медианные значения (в, г). Планки погрешностей обозначают нижние и верхние квартили

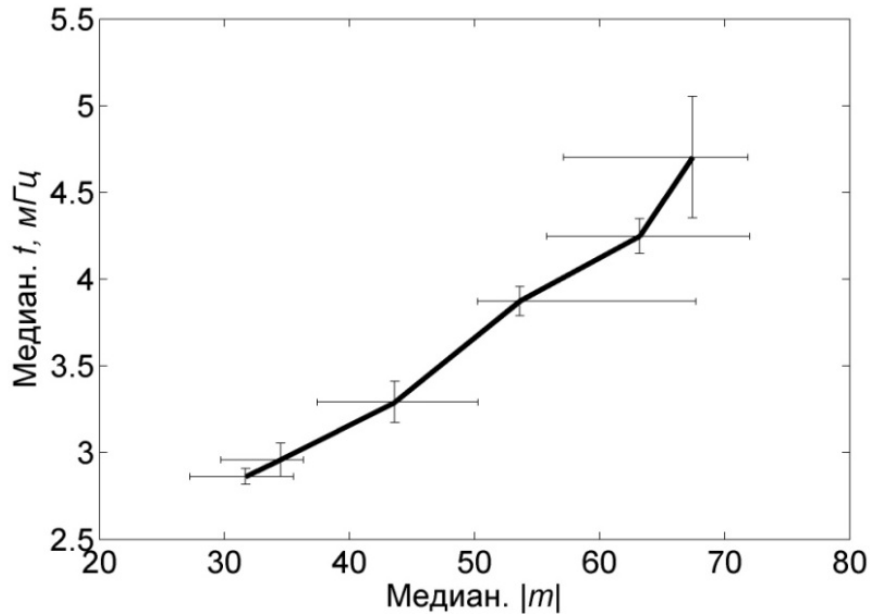


Рис. 7. Зависимость медианных значений частоты от азимутального числа  $m$ . Планки погрешностей обозначают нижние и верхние квартили

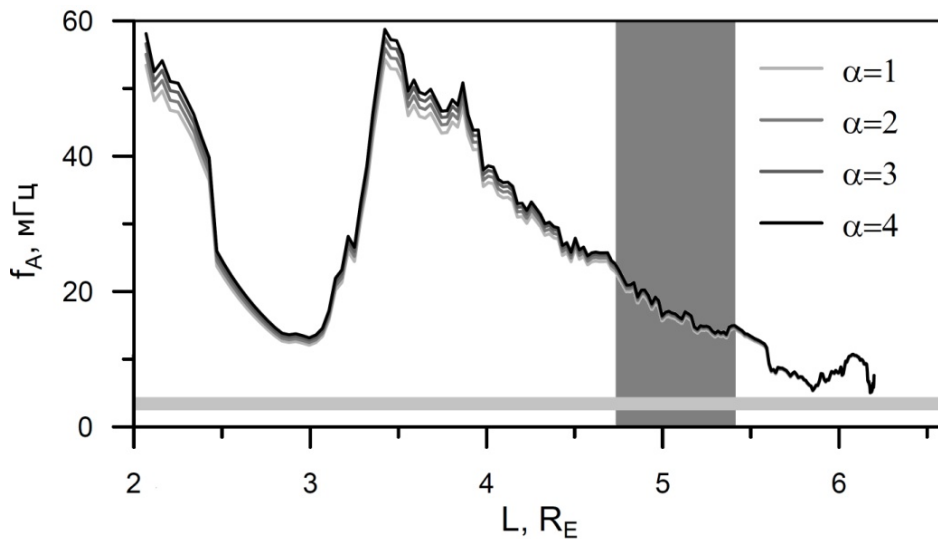


Рис. 8. Зависимость частоты главной альфвеновской моды от номера магнитной оболочки по данным спутника RBSP-B для разных величин параметра  $\alpha$  степенной модели распределения частиц вдоль силовой линии. Горизонтальная серая полоса обозначает диапазон частот колебаний, зарегистрированных радаром. Вертикальная полоса обозначает диапазон магнитных оболочек, в пределах которых они наблюдались

Такая зависимость свойственна дрейфово-компрессионной моде [Mager et al., 2013]. Также линейная зависимость  $f(m)$  характерна и для дрейфово-зеркальной моды, но, как обсуждается в разделе 3.2, условия генерации дрейфово-зеркальной моды не типичны для магнитосферы.

В разделе 3.4 рассматривается случай наблюдений 25 декабря 2014 г., в котором одновременно с радаром волна была зарегистрирована в данных спутника RBSP-B.

Колебания скорости ионосферной плазмы, зарегистрированные радаром в послеполуночном секторе, имели амплитуды до 80 м/с, соответствующие колебаниям величины электрического поля с амплитудой до 4 мВ/м (рис. 9). Частота колебаний была равна примерно 4 мГц. Волна распространялась на запад, значение азимутального волнового числа было около  $-40$ . Колебания наблюдались после периода суббуревой активности, которая развилась в результате длительного, около 12 ч, периода направленного на юг ММП.

Одновременно с радаром колебания с близкой частотой были зарегистрированы на спутнике RBSP-B в радиальной и продольной компонентах магнитного поля (рис. 10). В это время он также находился в послеполуночном секторе в области 3.0–4.1 MLT и двигался к Земле в диапазоне магнитных оболочек 4.0–4.8. Частота зарегистрированных спутником колебаний была порядка 4.2 мГц. Наибольшая мощность колебаний наблюдалась в продольной компоненте.

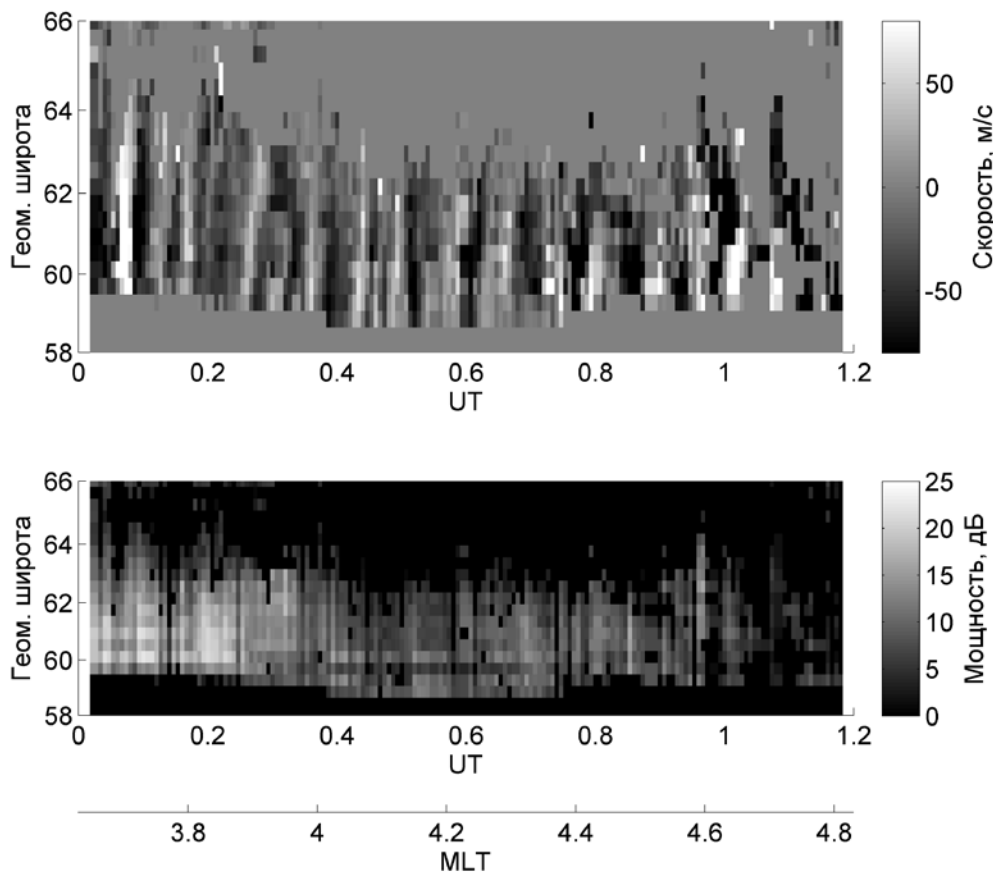


Рис. 9. Скорость плазмы вдоль луча 0. 25 декабря 2014 г.



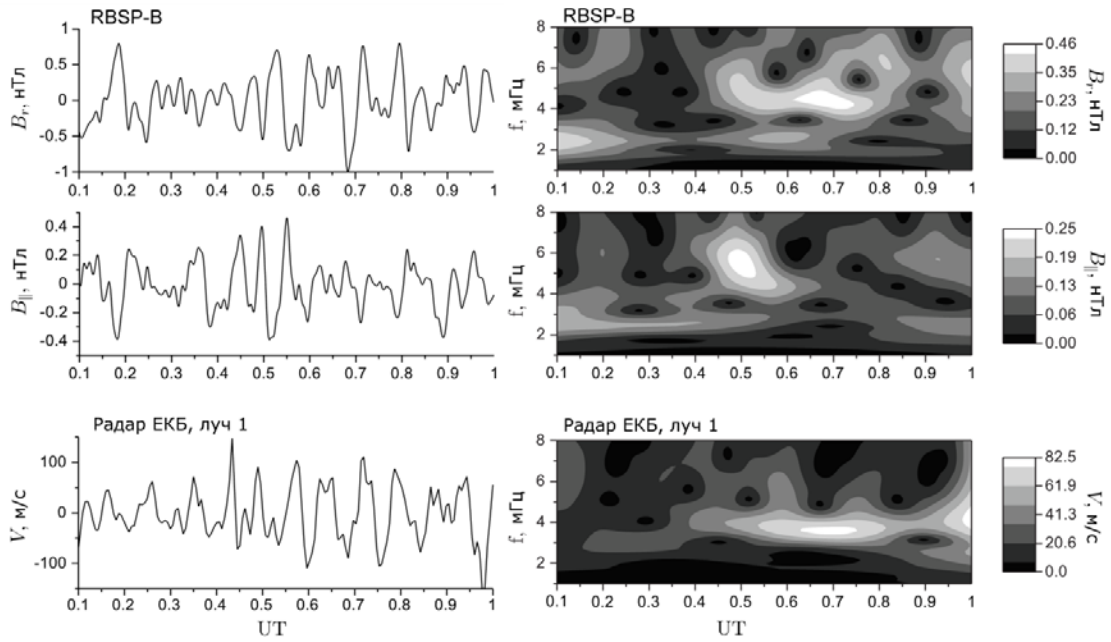
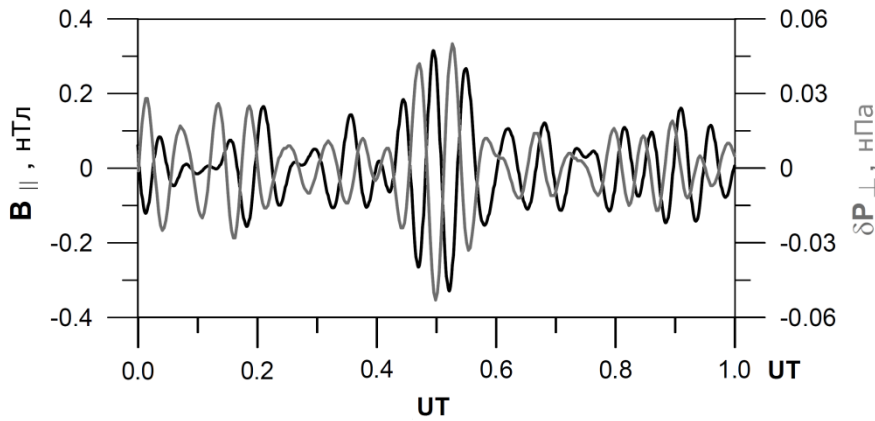


Рис. 10. Форма сигнала и его вейвлет-преобразование для радиальной и продольной компонент магнитного поля на спутнике RBSP-B (вверху) и данных радара (луч 1). Диапазон расстояний от радара примерно соответствует  $60.6^\circ$  геомагнитной широты (внизу). 25 декабря 2014 г.

Для анализа структуры волны проведено сопоставление возмущений продольной компоненты магнитного поля с возмущениями давления частиц (рис. 11). Видно, что колебания величин этих параметров находятся в противофазе. Это свойство типично для компрессионных волн. Данный случай наблюдения колебаний относится к тем, в которых частота волны, зарегистрированной с помощью радара, существенно ниже частоты стоячей альфвеновской волны на соответствующих магнитных оболочках. Альфвеновская частота была вычислена по данным спутника RBSP-B и изменялась в пределах 17–28 МГц, в несколько раз превышая частоту наблюдавшейся волны.

Как и в случае, описанном в разделе 3.3, анализ показывает, что наблюдаемую волну следует относить к дрейфово-компрессионной моде. Она наблюдается на фоне суббуревой активности, имеет малую длину волны в азимутальном направлении, направление ее распространения совпадает с направлением дрейфа протонов, ее частота существенно ниже альфвеновской частоты, а в данных спутников видны признаки компрессионной волны.

**Раздел 3.5** посвящен исследованию той части УНЧ-волн, зарегистрированных в ходе эксперимента, которые имели положительные азимутальные волновые числа, т. е. распространялись на восток. Из 74 устойчивых колебаний, обнаруженных в 39 случаях регистрации волновой активности, 11, т. е. около 13 % имеют положительные  $m$ .



*Рис. 11.* Возмущение продольной  $B_{||}$ -компоненты магнитного поля (черная кривая) и возмущение давления ( $\delta P_{\perp}$ , серая кривая) по данным RBSP-B.

Количество волн с положительными  $m$ , почти на порядок меньше, чем с отрицательными, соответствует результатам других исследований, в которых волны, распространяющиеся на восток, наблюдаются существенно реже [Eriksson et al., 2006; Le et al., 2011].

В отношении природы волн с положительными  $m$  на сегодняшний день нет полной ясности. Зачастую их относят к альфвеновским волнам. Костарев и Магер [2017] показали, что в диапазоне Pc5 дрейфово-компрессионная мода также может распространяться в направлении дрейфа электронов.

В случае семи волн была возможность сравнения их частот с частотами альфвеновского резонанса силовых линий, рассчитанными по данным спутников, пересекавших соответствующие магнитные оболочки в секторе наблюдения (раздел 3.1). В двух случаях частоты оказались близки к вычисленным альфвеновским частотам, и соответственно эти колебания могут являться стоячими альфвеновскими волнами. Еще в пяти случаях частоты колебаний, зарегистрированных радаром, были в несколько раз ниже соответствующих альфвеновских частот.

Для четырех случаев было оценено радиальное волновое число. В остальных случаях разность фаз сигнала на разных широтах была слишком мала по сравнению с временным разрешением, поэтому эта величина не была оценена. Хотя точность определения радиального волнового числа невысока (ошибка достигает 40 %), и его значения могли изменяться в пределах периода наблюдения колебания, расчеты дают представление о нем и о направлении распространения волны вдоль меридиана. В таблице показаны результаты расчетов вместе с волновыми числами в азимутальном направлении.

Радиальные волновые числа колебаний с положительными  $m$ 

Дата	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$L_1$	$L_2$	$k_r$	$k_a$	$m$
18.04.2014	59.3	60.9	3.89	4.29	1.4	4.3	22
17.09.2014	58.9	60.2	3.80	4.09	0.9	1	5
19.10.2014	62.9	63.4	4.99	5.13	3.9/−0.2	2.6	17
14.03.2015	64.9	66.1	5.67	6.20	1	0.8	6

Девятнадцатого октября 2014 г. волна изначально распространялась в меридиональной плоскости к полюсу, однако в 02:51 UT радиальная компонента волнового вектора значительно уменьшилась. В таблице для этой волны приведены два значения  $k_r$ , до и после 02:51 UT. Возможно, произошла смена направления распространения (знак минус означает распространение к экватору), однако ограниченное временное разрешение затрудняет точное определение направления, поскольку малое значение  $k_r$  сравнимо с величиной ошибки. В остальных случаях волна распространялась в сторону полюса. В двух приведенных случаях волны характеризуются смешанной поляризацией в плоскости, перпендикулярной силовым линиям, и имеют малые значения азимутального волнового числа. Еще в одном случае, характеризующимся большим  $m$ , доминировала полоидальная компонента колебаний ( $k_a > k_r$ ). В случае 19 октября 2014 г. поляризация волны сначала была смешанной, а после смены направления распространения сменилась на преимущественно полоидальную. При этом азимутальное волновое число волны существенно не изменилось.

В случаях наблюдения волн с малыми  $m$  распространение в направлении экватор–полюс согласуется как с теорией (альфвеновская частота уменьшается с удалением от Земли, фазовая скорость в азимутальном направлении снижается с ростом широты, что приводит к распространению таких волн в направлении полюса), так и с ранее проводившимися наблюдениями [напр., Fenrich et al., 1995; Wright, Allan, 1996].

Случай наблюдения 19.10.2014, когда волна изначально распространялась в сторону полюса, но затем фазовая скорость в направлении полюс–экватор сильно уменьшилась, согласуется с представлениями о свойствах распространения волн с большими  $m$ . Их генерацию внутри магнитосферы связывают с облаками заряженных частиц, дрейфующих в азимутальном направлении и имеющих более высокую скорость частиц на дальних магнитных оболочках. Неравенство скоростей приводит к более высокой скорости фазового фронта на высоких широтах и соответствующему распро-

странению волны в сторону экватора [Mager et al., 2009]. В приведенном случае колебания, вероятно, генерировались облаком электронов, дрейфующих от области полуночного меридиана в послеполуночном секторе.

Свойства волны, зарегистрированной 18.04.2014 с промежуточным значением  $m$  согласуются с представлениями о стоячих альфвеновских волнах, источником энергии которых являются либо энергичные частицы, инжектированные со стороны хвоста, либо взаимодействие с компрессионной модой, распространяющейся со стороны полуночи, что является более вероятным в случае полоидальных волн [Mager, Klimushkin, 2008; Baddeley et al., 2004].

Таким образом, результаты наблюдений волн с положительными азимутальными волновыми числами согласуются с выводами предыдущих исследований. Часть этих волн, имеющая частоты ниже частот альфвеновских стоячих волн, предположительно может быть отнесена к дрейфово-компрессионной моде. Эта гипотеза согласуется с теорией, однако в дальнейшем требует дополнительных исследований.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

- В ходе эксперимента с помощью Екатеринбургского радара получены высококачественные наблюдательные данные, зарегистрировано около 40 случаев наблюдения УНЧ-волн. Проведена полная обработка исходных данных и выполнен первичный анализ. Определены частоты и длительности колебательных компонент. По разности фаз между двумя соседними лучами определены направления распространения и оценены азимутальные волновые числа колебаний. Показано, что большая часть, более 85 %, в азимутальном направлении распространяется на запад.

- Для части случаев регистрации колебаний были использованы данные спутников о параметрах магнитного поля и концентрации плазмы в магнитосфере в секторе проведения радарных наблюдений. С их помощью проведено сравнение частот наблюдаемых с помощью радара колебаний с частотами стоячих альфвеновских волн на тех силовых линиях, в области проекции которых с помощью радара регистрировались волны. Приведенная методика применялась для 33 случаев регистрации УНЧ-волн. Из них 28 имеют частоты существенно ниже альфвеновских, с различием величин на 40 % и более. Показано, что они не могут относиться к альфвеновской моде, к которой часто принято относить наблюдаемые с помощью радаров волны с высокими значениями азимутального волнового числа. Показано также, что эти волны могут соотноситься с дрейфово-компрессионной модой. Частоты остальных пяти волн отличаются от соответствующих альфве-

новских частот не более чем на 20 %. учитывая неточности использовавшихся при вычислениях моделей, эти колебания можно отнести к резонансу силовых линий.

- Для одной из волн, зарегистрированной одновременно в данных радара и спутника RBSP-B, показано наличие дополнительных признаков, свойственных дрейфово-компрессионной моде: колебания магнитного поля находятся в противофазе с возмущениями давления частиц и потоков энергичных протонов, волна распространяется в направлении дрейфа протонов в магнитосфере.

- В одном из случаев наблюдения колебаний с помощью радара выявлена близкая к линейной зависимость частоты волны от азимутального волнового числа. Такая зависимость на фиксированной магнитной оболочке характерна только для дрейфово-компрессионной и дрейфово-зеркальной мод. Однако тот факт, что условия возникновения последней не типичны для магнитосферы, позволяет прийти к выводу о дрейфово-компрессионной моде как источнике наблюдаемой волны.

- Проведен анализ той части наблюдаемых с помощью радара волн, которые имели положительные азимутальные волновые числа. Для ряда случаев определена длина волны в меридиональной плоскости и радиальное направление распространения. Показано, что характер распространения этих волн согласуется с теорией и результатами предыдущих исследований. Часть волн с положительными  $m$ , имеющая частоты ниже частот альфвеновских стоячих волн, предположительно может быть отнесена к дрейфово-компрессионной моде. Эта гипотеза согласуется с теорией, однако в дальнейшем требует дополнительных исследований.

### Публикации по теме диссертации

Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Y., Bergardt O.I., Mager O.V. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg Coherent Decameter Radar case study // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* — 2016. — Vol. 121. — P. 1315–1326.

Челпанов М.А., Магер О.В., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Бернгардт О.И. Одновременные наблюдения дрейфовых компрессионных волн в магнитосфере с помощью Екатеринбургского когерентного декаметрового радара и спутниковых измерений // *Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Apatity. — 2017. — P. 62–65.

Челпанов М.А., Магер О.В., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Бернгардт О.И. Наблюдения длиннопериодных пульсаций в ночной магнитосфере с помощью Екатеринбургского когерентного среднеширотного радара // *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*. — 2017. — С. 152–154.

Chelpanov M.A., Mager O.V., Mager P.N., Klimushkin D.Y., Bergardt O.I. Properties of frequency distribution of Pc5-range pulsations observed with the Ekaterinburg decameter radar in the nightside ionosphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* — 2018. — Vol. 167. — P. 177–183.

Челпанов М.А., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Магер О.В. Наблюдения магнитосферных волн, распространяющихся в направлении дрейфа электронов, с помощью Екатеринбургского когерентного радара // *Солнечно-земная физика*. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 68–76.

### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А. Продольная структура баллонных МГД-возмущений в модельной магнитосфере // *Косм. иссл.* — 2014. — Т. 52. — № 3. — С. 187.

Anderson B.J. Statistical studies of Pc 3-5 pulsations and their relevance for possible source mechanisms of ULF waves // *Ann. Geophysicae*. — 1993. — Vol. 11. — P. 128–143.

Baddeley L.J., Yeoman T.K., Wright D.M., Trattner K.J., Kellet B.J. Statistical study of unstable particle populations in the global ring current and their relation to the generation of high- $m$  ULF waves // *Ann. Geophys.* — 2004. — Vol. 22. — P. 4229–4241.

Bland E.C., McDonald A.J., Menk F.W., Devlin J.C. Multipoint visualization of ULF oscillations using the Super Dual Auroral Radar Network // *Geophys. Res. Lett.* — 2014. — Vol. 41. — P. 6314–6320.

Crabtree C., Horton W., Wong H.V., van Dam J.W. Bounce-averaged stability of compressional modes in geotail flux tubes // *J. Geophys. Res.* — 2003. — Vol. 108. — P. 1084.

Crabtree C., Chen L. Finite gyroradius theory of drift compressional modes // *Geophys. Res. Lett.* — 2004. — Vol. 31. — L17804.

Eriksson P. T.I., Blomberg L.G., Glassmeier K.-H. Cluster satellite observations of mHz pulsations in the dayside magnetosphere // *Adv. Space Res.* — 2006. — V. 38. — P. 1730–1737.

Fenrich F.R., Samson J.C., Sofko G., Greenwald R.A. ULF high- and low- $m$  field line resonances observed with the Super Dual Auroral Radar Network // *J. Geophys. Res.* — 1995. — Vol. 100. — P. 21535–21547.

Hurricane O.A., Pellat R., Coroniti F.V. The kinetic response of a stochastic plasma to low frequency perturbations // *Geophys. Res. Lett.* — 1994. — Vol. 21. — No. 4. — P. 253–256.

James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. The spatio-temporal characteristics of ULF waves driven by substorm injected particles // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* — 2013. — Vol. 118. — P. 1737–1749.

James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Multiradar observations of substorm-driven ULF waves // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* — 2016. — Vol. 121. — P. 5213–5232.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N. Spatial structure and stability of coupled Alfvén and drift compressional modes in non-uniform magnetosphere: Gyrokinetic treatment // *Planet. Space Sci.* — 2011. — Vol. 59. — Iss. 13. — P. 1613–1620.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N. The Alfvén mode gyrokinetic equation in finite-pressure magnetospheric plasma // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* — 2015. — Vol. 6. — P. 4465–4474.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Glassmeier K.-H. Spatio-temporal structure of Alfvén waves excited by a sudden impulse localized on an L-shell // *Ann. Geophys.* — 2012a. — Vol. 30. — No. 7. — P. 1099–1106.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Pilipenko V.A. On the ballooning instability of the coupled Alfvén and drift compressional modes // *Earth, Planets and Space*. — 2012b. — Vol. 64. — P. 777–781.

Le G., Chi P.J., Strangeway R.J., Slavin J.A. Observations of a unique type of ULF wave by low-altitude Space Technology 5 satellites // *J. Geophys. Res.* — 2011. — V. 116. — A08203.

Leonovich A.S., Kozlov D.A. Magnetosonic resonances in the magnetospheric plasma // *Earth, Planets and Space*. — 2013. — Vol. 65. — P. 369–384.

Mager P.N., Klimushkin D.Y. Alfvén ship waves: High  $m$  ULF pulsations in the magnetosphere generated by a moving plasma inhomogeneity // *Ann. Geophys.* — 2008. — Vol. 26. — P. 1653–1663.

Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Ivchenko N. On the equatorward phase propagation of high- $m$  ULF pulsations observed by radars // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* — 2009. — Vol. 71. — Iss. 16. — P. 1677–1680.

Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Kostarev D.V. Drift-compressional modes generated by inverted plasma distributions in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* — 2013. — Vol. 118. — P. 4915–4923.

Ponomarenko P.V., Menk F.W., Waters C.L. Visualization of ULF waves in SuperDARN data // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — Vol. 30. — P. 1926.

Yeoman T.K., Wright D.M., Chapman P.J., Stockton-Chalk A.B. High-latitude observations of ULF waves with large azimuthal wavenumbers // *J. Geophys. Res.* — 2000. — Vol. 105. — No. A3. — P. 5453–5462.

Walker A.D.M., Ruohoniemi J.M., Baker K.B., Greenwald R.A., Samson J.C. Spatial and temporal behavior of ULF pulsations observed by the Goose Bay HF radar // *J. Geophys. Res.* — 1992. — Vol. 97. — Iss. A8. P. 12187–12202.

Wright A.N., Allan W. Structure, phase motion, and heating within Alfvén resonances // *J. Geophys. Res.* — 1996. — Vol. 101. — P. 17399–17408.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ № 193 от 3 декабря 2019 г.

Объем 24 стр.

Тираж 150 экз.