

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 когерентного рассеяния**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико–математических наук

Научный руководитель:  
кандидат физико–математических наук

Магеп П.Н.

Иркутск – 2019

## Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Современное состояние изучения длиннопериодных магнитосферных пульсаций.....	11
Глава 2. Методы проведения исследования УНЧ-колебаний с помощью Екатеринбургского радара.....	32
2.1. Использованные инструменты и получение наблюдательных материалов .....	32
2.2. Методы обработки данных.....	37
2.3. Регистрация волн Екатеринбургским радаром .....	44
Глава 3. Характеристики магнитосферных волн, зарегистрированных с помощью Екатеринбургского радара.....	48
3.1. Сравнение частот наблюдаемых волн с частотами собственных колебаний силовых линий .....	49
3.2. Идентификация мод наблюдаемых радаром колебаний .....	55
3.3. Особенности структуры колебаний 26 декабря 2014 г. ....	59
3.4 Одновременные наблюдения колебаний на спутнике и радаре 25 декабря 2014 г. ....	65
3.5. Свойства колебаний с положительными азимутальными волновыми числами .....	70
Заключение .....	77
Список литературы .....	79

## Введение

### Актуальность темы исследования

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 [Potapov, Mazur, 1994].

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. Природа буревых компрессионных пульсаций 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 диссертационной работы заключается в экспериментальном исследовании и определении свойств длиннопериодных геомагнитных пульсаций на основе данных когерентного радара с использованием измерений доплеровского смещения 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 поставленной целью решался ряд конкретных задач:

- Обработка наблюдательных данных: выявление случаев регистрации УНЧ-волн, вейвлет-анализ данных о колебаниях, определение азимутальных волновых чисел; анализ параметров магнитного поля и плазмы в магнитосфере, полученных на спутниках в период регистрации колебаний с помощью радара. Для обработки данных использованы программы, разработанные в среде MATLAB на основе современных методов вейвлет-анализа.

- Исследование закономерностей частотного распределения зарегистрированных радаром колебаний, выявление особенностей, таких, как направления распространения в азимутальном и радиальном направлениях, зависимость частоты от азимутального волнового числа; взаимосвязь частот с частотами альфвеновского резонанса силовых линий.

- Определение мод зарегистрированных колебаний; оценка доли колебаний, относящихся к собственным колебаниям силовых линий, и к другим модам, в частности, дрейфово-компрессионной.

### **Методы исследования**

Диссертация выполнена с использованием данных Екатеринбургского когерентного радара: использовались доплеровские сдвиги частоты сигнала обратного рассеяния и мощности сигнала. Их временное разрешение составляет 18 секунд. Дополнительно используются данные спутников RBSP-A, RBSP-B, THEMIS D и E о параметрах магнитного поля и концентрации частиц; данные спутников WIND и ACE о скорости и плотности солнечного ветра. Также используются значения индексов авроральной и геомагнитной активности Kp, SYM-H, AU, AL, AE.

### **Научная новизна**

- Впервые экспериментально зарегистрирована зависимость частоты волны от азимутального волнового числа для фиксированной магнитной оболочки. Такая зависимость свойственна дрейфово-компрессионной моде.

- Проведены первые синхронные спутниковые и радарные наблюдения дрейфово-компрессионной волны. 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, что расходится с принятыми представлениями о волнах диапазона Pc5 как о стоячих альфвеновских волнах, и относятся к другим модам. По меньшей мере часть из них следует определять как дрейфово-компрессионную моду.

### **Научная и практическая значимость работы**

В работе рассмотрены случаи наблюдения дрейфово-компрессионных волн в магнитосфере и проведена оценка соотношения количества волн, относящихся к различным модам, на основе радарных наблюдений. 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 сопоставлению 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. Также полученные результаты могут быть использованы для изучения свойств магнитосфер других планет.

### **Достоверность результатов**

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.
- Международные конференции RadioSun-4 (Иркутск, 2015) и 5 (Ческе-Будеёвице, Чехия, 2016) Workshop & Summer School.
- БШФФ-2017. XV Конференция 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», Баниэльс-сюр-Мер (Франция), 2018.

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

- С помощью радара когерентного рассеяния и спутниковых миссий установлено, что частоты ультранизкочастотных волн, наблюдаемых в ночной части магнитосферно-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 полагать, что наблюдаемые волны наиболее вероятно являются дрейфово-компрессионными волнами, частоты которых ниже альфвеновских, и которые могут генерироваться неустойчивыми распределениями энергичных протонов или электронов, находящимися в дрейфовом резонансе с волной.

- Для отдельного случая наблюдения в ночной ионосфере ультранизкочастотной 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, опубликованы в 5 печатных работах:

- Chelpanov M.A., P.N. Mager, D.Y. Klimushkin, O.I. Berngardt, O.V. Mager Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. Vol. 121. P. 1315–1326.

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

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

- Chelpanov M.A., O.V. Mager, P.N. Mager, D.Y. Klimushkin, O.I. Berngardt Properties of frequency distribution of Pc5-range pulsations observed with the Ekaterinburg decameter radar in the nightside ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. Vol. 167. P. 177–183.

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

из них три статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, и 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.

## **Глава 1. Современное состояние изучения длиннопериодных магнитосферных пульсаций**

Ультранизкочастотные электромагнитные пульсации регулярно наблюдаются в различных областях магнитосферы, а также на земной поверхности. Изначально обнаруженные в середине XIX века во время сильных магнитных возмущений, они были затем зарегистрированы и на фоне спокойной геомагнитной обстановки [Chapman, Bartels, 1962]. К ультранизкочастотным колебаниям относят волны в диапазоне частот от 1 мГц до 1 Гц [McPherron, 2005]. Некоторые авторы относят к ним колебания с частотами до 10 Гц [Villante, 2007; Menk, 2011]. Источники этих колебаний находятся и в магнитосфере, и в области магнитопаузы, и в солнечном ветре. Ультранизкочастотные волны играют важную роль в формировании распределения энергичных частиц. Они участвуют в переносе энергии солнечного ветра в магнитосферу. Помимо влияния на различные процессы, УНЧ-волны также доносят до наблюдателя информацию о свойствах околоземного космического пространства и состоянии магнитосферы. Так, по частотам собственных колебаний силовых линий можно оценить концентрацию плазмы вдоль них [Троицкая, Гульельми, 1969; Menk et al., 1999; Clilverd et al., 2003]. Изменения параметров межпланетного магнитного поля (ММП) также оказывают влияние на характеристики магнитосферных УНЧ-колебаний.

Геомагнитные пульсации, возникающие и распространяющиеся в околоземной плазме описываются законами магнитной гидродинамики (МГД). В холодной плазме, где газовое давление мало, одной из ветвей МГД-колебаний являются альфвеновские волны. Они распространяются преимущественно

вдоль силовых линий магнитного поля подобно колебаниям струны: возмущение магнитного поля и смещение ионов благодаря свойству вмерзновенности происходит в одном направлении, перпендикулярно фоновому полю. Скорость распространения волны вдоль силовой линии определяется величиной магнитного поля и плотностью плазмы. Поскольку по краям замкнутых силовых линий магнитосферы находится ионосфера, которая из-за высокой проводимости способна отражать эти колебания, на них формируются стоячие альфвеновские волны.

Другой ветвью колебаний, которые распространяются вдоль линий магнитного поля, является медленный магнитный звук (ММЗ). Он представляет собой продольные колебания, распространяющиеся вдоль трубок силовых линий. Полное описание ММЗ, помимо теории МГД, требует привлечения кинетического подхода [Козлов, Леонович, 2011].

Еще одной ветвью МГД-колебаний является быстрый магнитный звук (БМЗ). Направление распространения БМЗ-волн не зависит от направления магнитного поля. Неоднородность магнитосферы обуславливает связь БМЗ-мод с альфвеновскими, одним из источников возникновения которых в магнитосфере и являются БМЗ-колебания. В определенных условиях частота БМЗ-волны совпадает с частотой альфвеновских стоячих колебаний, что приводит к возникновению альфвеновского резонанса — резонансной раскачке альфвеновской волны быстрым магнитным звуком [Southwood, 1974; Chen and Hasegawa, 1974; Leonovich and Mazur, 1989]. БМЗ, в свою очередь, попадает в магнитосферу из солнечного ветра, возникает на границе магнитосферы благодаря сдвиговому течению или генерируются неустойчивостями плазмы внутри нее [Lee et al., 1981; Potapov, Mazur, 1994].

На основе морфологических особенностей пульсаций, их разделяют на две категории: (1)  $P_c$ , периодические и квазипериодические, обычно имеющие выраженный спектральный максимум; (2)  $P_i$ , иррегулярные, проявляющиеся импульсами, длящимися в пределах нескольких минут и имеющие чаще всего широкий спектр. Помимо спектральных особенностей и длительности, пульсации  $P_c$  и  $P_i$  отличаются и другими характеристиками. Например,

импульсные пульсации чаще наблюдаются в ночные часы, а непрерывным свойственно появление в дневные [Троицкая, 1956].

И первый, и второй вид пульсаций разделяют по частотам на два типа по длине периодов: короткопериодные, с периодами 0,2–10 секунд и длиннопериодные, включающие в себя колебания с более низкими частотами. Короткопериодные пульсации обычно представляют собой бегущие вдоль силовой линии магнитного поля волны. Для них характерна частотная и амплитудная модуляция. Длиннопериодные пульсации, в свою очередь, связывают со стоячими волнами. Широко применяется более детальная классификация волн по частоте [Jacobs et al., 1964, Троицкая и Гульельми, 1969]. Хотя это разделение и имеет под собой определенную физическую подоплеку, колебания с близкими частотами могут быть проявлениями разных явлений. К диапазону Pc1 периодических пульсаций относятся пульсации с периодами 0,2–5 секунд, к Pc2 — 5–10 секунд, к Pc3 — 10–45 секунд, к Pc4 — 45–150 секунд, к Pc5 — 150–600 секунд. Кроме того, выделяют диапазон Pc6, к которому относят колебания с периодами более 600 секунд. Иррегулярные пульсации делятся на три диапазона: Pi1 охватывает периоды от 1 до 40 секунд, Pi2 — от 40 до 150 секунд, Pi3 — более 150 секунд. Максимальная частота пульсаций соответствует гирочастоте протонов в магнитосфере — порядка нескольких герц.

Среди длиннопериодных колебаний выделяют два класса, основываясь на масштабе колебаний в азимутальном направлении: пульсации с малыми и большими азимутальными волновыми числами  $m$ . Малыми  $m$  считаются значения порядка единиц, а большими — порядка десятков и сотен (рис. 1). Значения из диапазона 10–20 часто относят к промежуточным значениям азимутального волнового числа.

Существует ряд способов определения  $m$  [Zong et al., 2017]. Обычно эти методики сводятся к нахождению отношения разности фаз волны в азимутально разнесенных точках измерения к разности долгот между ними. При этом могут быть использованы как наземные, так и спутниковые данные. Принято считать, что у волн, распространяющихся на восток и на запад, значения  $m$  положительные и отрицательные, соответственно.

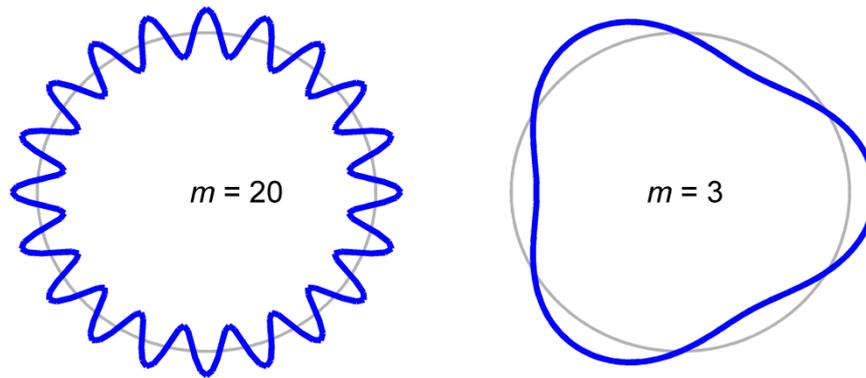


Рисунок 1. Колебания с большими и малыми азимутальными волновыми числами.

Оценивание величины азимутального волнового числа играет важную роль в определении механизмов генерации тех или иных длиннопериодных пульсаций. Волны с источниками в солнечном ветре, либо связанные с его взаимодействием с магнитосферой, имеют малые, порядка единиц, азимутальные волновые числа. Это объясняется сильным затуханием волн с большой азимутальной компонентой между магнитопаузой и силовыми линиями, на которых мог бы возникнуть резонанс [Eriksson et al., 2005]. Поэтому внемагнитосферные процессы не эффективны в качестве источников волн с высокими  $m$  — в этом случае основная часть энергии колебаний не проникает в магнитосферу [Гульельми, Потапов, 1984]. Колебаниям с малыми  $m$  свойственна преимущественно тороидальная поляризация. Радарные наблюдения показывают, что обычно такие волны распространяются к полюсу [Yeoman et al., 2012]. Теория резонанса силовых линий объясняет эту особенность тем, что за пределами плазмопаузы вслед за альфвеновской скоростью с ростом номера магнитной оболочки снижается частота резонанса силовых линий, что приводит к распространению фазы волны к полюсу [Walker et al., 1979].

Волны, генерирующиеся внутримангнитосферными процессами, имеют большие, порядка десятков, и даже сотен, азимутальные волновые числа. Зачастую эти волны идентифицируют как полоидальные альфвеновские моды: силовые линии при колебаниях этой моды смещаются в меридиональной плоскости; в отличие от них, тороидальная мода представляет собой колебания

силовых линий преимущественно в азимутальном направлении (рис. 2). С помощью радарных наблюдений обнаружено, что фаза волн с большими  $m$  обычно распространяется от полюса к экватору [Tian et al., 1991; Yeoman et al., 1992, 2000]. Для случая распространяющихся на запад волн авторы работы [Mager et al., 2009] предположили, что эта особенность связана с ростом скорости дрейфа заряженных частиц в азимутальном направлении с увеличением расстояния от Земли. Из-за разности в скорости, облако заряженных частиц вытягивается в виде спирали в экваториальной плоскости. Это вызывает движение фазы волны в сторону Земли поперек магнитных оболочек и, соответственно её движение от полюса к экватору у поверхности Земли. Волны с промежуточными значениями азимутальных волновых чисел могут в каждом отдельном случае иметь свойства как пульсаций с большими  $m$ , так и с малыми [Yeoman et al., 2010; Hao et al., 2014].

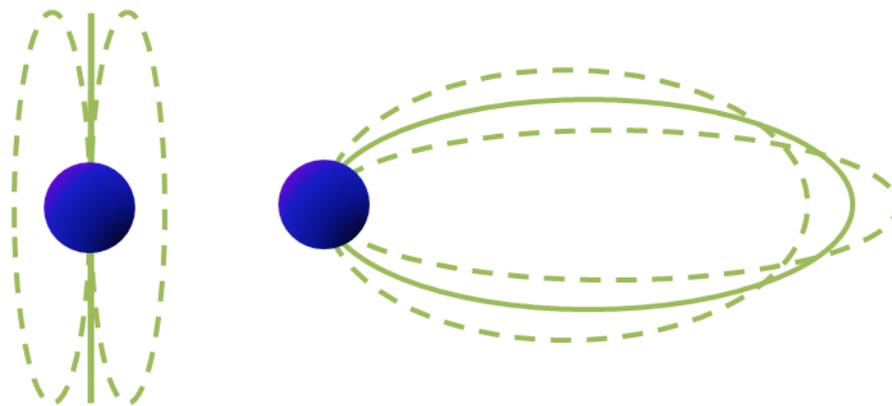


Рисунок 2. Тороидальные и полоидальные колебания.

Часто форма колебаний Pc1, самых короткопериодных из УНЧ-волн, обусловлена биениями — периодическими изменениями амплитуды волны, из-за которых их принято называть жемчужинами [Sucksdorff, 1936]. Причина возникновения жемчужин состоит в дисперсии скоростей при распространении колебаний вдоль силовых линий и отражении от ионосферы в противоположных полушариях. Характерный спектр жемчужин представляет собой череду наклонных элементов. В пределах одного волнового пакета высокочастотные колебания имеют скорость ниже, чем низкочастотные. Огибающая колебаний имеет период порядка 100 секунд, а их частота за это

время возрастает на 0,1–0,3 Гц [Demekhov, 2007]. Генерацию жемчужин связывают с температурной анизотропией магнитосферной плазмы, благодаря которой возникают ионно-циклотронные волны. Хотя источником таких волн считаются процессы внутри магнитосферы, по данным многих авторов, на них в свою очередь могут влиять колебания параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля [Kaye, Kivelson, 1979]. Однако, только небольшая часть жемчужин связана с внезапным началом бурь и внезапными импульсами межпланетного магнитного поля. При этом остается не вполне понятным, что именно инициирует развитие неустойчивости в других случаях [Engebretson et al., 2002]. Пульсации типа Pc1 могут наблюдаться одновременно в диапазоне нескольких десятков градусов по долготе и нескольких градусов по широте. Наиболее часто они регистрируются в ранние утренние часы. Отмечается зависимость их частоты и других свойств от времени суток [Афанасьева, 1978], сезона [Яхнин и др., 2004], а также от фазы солнечного цикла [Матвеева, 1987].

Короткопериодные иррегулярные пульсации, Pi1, отличаются разнообразием морфологических признаков. В отличие от пульсаций Pc1, Pi1 имеют широкий спектр и регистрируются одновременно в сопряженных точках. Наиболее часто наблюдающиеся типы таких пульсаций обозначаются аббревиатурами PiB, PiC и КУП (колебания убывающего периода). Их активность существенно возрастает во время геомагнитных бурь и при развитии суббурь и часто совпадает с усилением авроральных сияний, поглощением радиощумов и ионосферными возмущениями [Троицкая, Гульельми, 1969]. Например, наличие пульсаций PiB — широкополосных шумовых импульсов длительностью 1–3 минуты — характерно для аврорального брейкапа. Их высокая частота по сравнению с другими видами пульсаций, связанных с суббурями, позволяет точно определить время начала события. Некоторым затруднением при этом является то, что область их наблюдения часто меньше, чем в случае других видов пульсаций, кроме того, для их регистрации требуются магнитометры с высоким временным разрешением. Источником большинства пульсаций PiB считаются колебания амплитуды ионосферных токов, вызванные изменениями в проводимости,

связанными с высыпаниями электронов [Гульельми, Золотухина, 1980; Магер, Климушкин, 2007].

Пульсации типа PiC наблюдаются в течение большего по сравнению с PiB периода времени, до нескольких часов, и имеют более узкий, чем у PiB спектр с преобладающими частотами в полосе 100–200 мГц. Они представляют собой серию импульсов, разделенных интервалами в 5–15 секунд. Такие колебания часто наблюдаются в восстановительную фазу суббури и сопровождаются колебаниями свечения авроральных сияний и риометрического поглощения. Как и в случае PiB, их источником считаются ионосферные токи и токи, вытекающие из ионосферы. Пульсации PiC модулируются под воздействием пульсирующих высыпаний частиц, меняющих проводимость ионосферы. Максимальные амплитуды PiB свойственны авроральным областям, в то время как наиболее интенсивные пульсации PiC регистрируются скорее вблизи экваториальной границы авроральной зоны. Характерны два максимума появления таких пульсаций, в районе местной полуночи и в предполуденном секторе. Причем в полуночном максимуме наблюдаются и PiB, и PiC, в то время как для предполуденного свойственны только PiC. Из-за того, что их источник находится в ионосфере, эти виды колебаний редко регистрируются в магнитосфере, так как они не могут туда распространяться.

Во время развития сильных суббурь в районе восточной электроструи наблюдаются КУП — широкополосные сигналы, частота которых постепенно увеличивается начиная от десятых долей до 1–2 Гц. Скорость роста обычно составляет 5–30 мГц в минуту. При этом она выше в послеполуденном секторе и ниже в предполуденном, кроме того, возрастает с уменьшением широты наблюдений [Pikkarainen et al., 1983]. Конечная частота КУП также выше на низких широтах, однако обычно не превышает гирочастоты ионов гелия в экваториальной плоскости на соответствующей силовой линии. Такие колебания регистрируются сериями, каждый элемент в течение нескольких десятков минут. Их спектры напоминают спектры жемчужин, но в свойствах этих типов волн есть существенные различия. Например, КУП наблюдаются одновременно в сопряженных точках. Известно небольшое число случаев, когда колебания этого типа одновременно с наземными магнитометрами

наблюдались и в магнитосфере [Perraut et al., 1978]. Их источником, как и в случае Pc1, считается ионно-циклотронная неустойчивость.

Основным источником пульсаций диапазона Pc2 также принято считать ионно-циклотронную неустойчивость. Однако, в этом случае в ионно-циклотронном резонансе участвуют тяжелые ионы, гелий и кислород [Fraser et al., 1992]. Их количество в магнитосфере существенно возрастает в возмущенные периоды, что совпадает с условиями наблюдения пульсаций Pc2 на средних широтах. Помимо этого, возрастает частота их наблюдений и средняя амплитуда в максимумы солнечного цикла [Троицкая, Гульельми, 1969], что также согласуется с колебаниями количества ионов кислорода в магнитосфере. Кроме того, в диапазоне Pc2 могут находиться частоты высших гармоник альфвеновского резонанса силовых линий. Во время низкой геомагнитной активности на земной поверхности эти пульсации преимущественно наблюдаются в высоких магнитных широтах, относящихся к авроральным областям. В работе [Гульельми и др., 1989] высказана гипотеза о том, что на средних широтах среди волн диапазона Pc2 есть те, которые проникают в магнитосферу извне. По результатам обработки и анализа данных обсерватории Борок и их сравнения с условиями в межпланетной среде, авторы предположили, что часть наблюдаемых пульсаций обусловлена неустойчивостью распределения протонов солнечного ветра перед фронтом магнитосферы.

Пульсации диапазонов Pc3 и Pc4 считаются наиболее часто наблюдаемыми видами колебаний магнитного поля Земли. На дневной стороне пульсации этого типа регистрируются практически непрерывно, как на поверхности, так и в магнитосфере [Saito, 1969]. По мере удаления от полуденного меридиана их амплитуда снижается. С увеличением геомагнитной широты она возрастает. Также возрастает и период колебаний. Нередко, особенно в возмущенных условиях, в одной точке одновременно наблюдаются колебания Pc3 и Pc4.

Для колебаний этих диапазонов характерна эллиптическая поляризация на средних и высоких широтах и близкая к линейной — на низких, причем плоскость поляризации обычно сонаправлена с меридианом. В случае

эллиптической поляризации, как правило, в северном полушарии в нижних средних широтах в предполуденном секторе преобладает левое вращение, а в послеполуденном — правое; в верхних средних и высоких широтах наблюдается обратная картина [Zybin, 1967, Southwood, 1974].

В средних широтах для спокойной магнитосферы типична регистрация устойчивых пульсаций в диапазоне Pc4. При этом усиление их интенсивности может происходить под действием изменения ориентации межпланетного магнитного поля, в том числе при низкой скорости солнечного ветра [Большакова и др., 1995]. Направление магнитного поля, близкое к линии Солнце–Земля является благоприятным фактором для наблюдения Pc4. Регистрация пульсаций Pc3 не свойственна для магнитоспокойных условий, частота их наблюдений в возмущенных условиях увеличивается. В целом, частота пульсаций в заданной точке растет с увеличением геомагнитной активности, и они чаще попадают в диапазон Pc3 и Pc2. Отмечается линейная зависимость частоты колебаний от напряженности межпланетного магнитного поля [Гульельми, 1984], причем коэффициент меняется в относительно небольших пределах и зависит от широты точки наблюдения, скорости солнечного ветра и времени суток [Соболев и др., 1987].

Наиболее существенное отличие природы пульсаций Pc3 и Pc4 от более короткопериодных состоит в том, что источниками их энергии преимущественно считаются процессы, связанные с солнечным ветром и его взаимодействием с магнитосферой. При этом обычно рассматриваются несколько механизмов переноса энергии внутрь магнитосферы и к поверхности Земли. Среди них — развитие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе при обтекании ее солнечным ветром и проникновение энергии волны через подсолнечную область и касп. Устойчивые колебания, регистрирующиеся на поверхности Земли и в магнитосфере, возникают в большинстве случаев при возбуждении альфвеновского резонанса колебаний силовых линий магнитного поля, частота собственных колебаний которых совпадает с частотой БМЗ-колебаний, имеющих немагнитосферный источник. Период собственных колебаний силовой линии представляет собой удвоенное время прохода по ней альфвеновской волны от одной точки отражения до

другой. Следовательно, период колебания определяется длиной данной силовой линии и, соответственно, номером магнитной оболочки, а также альфвеновской скоростью в каждой точке вдоль нее, которая, в свою очередь, зависит от напряженности магнитного поля и концентрации частиц. В итоге, период собственных колебаний силовой линии возрастает с ростом магнитной оболочки, но не монотонно, а с локальным максимумом в области плазмопаузы. Таким образом, по отношению к внешним широкополосным сигналам магнитосфера представляет собой своеобразный фильтр, реагирующий на определенные гармоники на разных магнитных оболочках. В работе [Takahashi, McPherron, 1982] показано, что к резонансу силовой линии относятся как минимум 10–30 процентов наблюдаемых на геостационарной орбите колебаний диапазона Pc3.

Такая схема возникновения устойчивых колебаний объясняет многие особенности пульсаций. Так, рост периодов с увеличением широты наблюдений соответствует большему периоду собственных колебаний силовых линий на дальних от Земли магнитных оболочках. Уменьшение периодов пульсаций с ростом геомагнитной активности связывается с уменьшением размеров магнитосферы под действием высокоскоростных потоков солнечного ветра и возрастающим темпом пересоединения в подсолнечной точке: изменение масштабов ведет к снижению длины силовых линий и, следовательно, к увеличению частоты собственных колебаний [Троицкая, Плясова-Бакунина, 1970].

Пульсации P<sub>i</sub>2, как и иррегулярные пульсации с меньшими периодами, тесно связаны с развитием суббурь. Традиционно, P<sub>i</sub>2 используются для определения времени их начала, хотя они могут сопровождать и псевдобрейкапы. Обычно эти пульсации наблюдаются в виде широкополосных всплесков длиной в 5–10 минут. Часто таких всплесков несколько, и они следуют друг за другом с небольшим перерывом. Спектр таких колебаний может иметь несколько максимумов на разных частотах, которые не меняются с изменением широты и долготы [Li et. al., 1998]. Однако, для высоких широт характерны доминирующие высокочастотные компоненты, являющиеся результатом высыпания частиц. В целом, амплитуда колебаний понижается по

мере уменьшения широты наблюдения. В районе проекции плазмопаузы наблюдается дополнительный максимум в широтном распределении амплитуд. Высокоширотные  $Pi2$  наблюдаются в ночные часы, долготный диапазон их наблюдения обычно ограничен 50–60 градусами. Самая высокая частота наблюдений и наибольшие амплитуды свойственны району полуночного меридиана. Пульсации в среднеширотном максимуме наблюдаются в существенно более широком диапазоне, включающем частично и дневную сторону, 16–06 часов местного времени, с максимумом частоты появлений около 22 часов [Li et al., 1998]. Они отличаются и по другим морфологическим признакам, например, свойствами поляризации. Очевидно, что колебания на высоких и низких частотах имеют разные, хоть и связанные между собой, источники. Пульсации, наблюдающиеся в авроральной зоне, связывают с развитием суббуревого токового клина и появлением в хвосте магнитосферы потоков энергичных электронов [Kerko, Kivelson, 1999]. Причиной пульсаций в средних и низких широтах считаются волноводная мода в плазмосфере [Yeoman, Orr, 1989]. Кроме того, для объяснения  $Pi2$  в этой области предлагались поверхностные волны на магнитопаузе, которые возбуждаются связанными с развитием суббури колебаниями силовых линий на авроральных широтах [Sutcliffe, 1975]. Однако спутниковые наблюдения этих колебаний в плазмосфере не подтвердили теорию поверхностных волн [Takahashi, Ohtani, 1995]. На геостационарной орбите  $Pi2$  также наблюдаются преимущественно в периоды высокой геомагнитной активности [Singer et al., 1983].

Пульсации  $Pc5$  характеризуются значительно большими амплитудами по сравнению с колебаниями меньших периодов. В высоких широтах, где эти пульсации преимущественно наблюдаются, их амплитуды достигают сотен нТл даже в умеренно возмущенных геомагнитных условиях. При этом зачастую колебания этого диапазона наблюдаются одновременно лишь в небольшом интервале широт. Обычно их амплитуды максимальны в авроральной области в ночное время.

Ряд свойств пульсаций  $Pc5$  повторяет свойства пульсаций  $Pc3-4$ : в среднем, большие периоды колебаний в возмущенных геомагнитных условиях, увеличение периодов с ростом широты, возможность одновременного

наблюдения нескольких спектральных максимумов. Другие морфологические свойства характерны только для колебаний этих частот. Например, особенности распределение частоты наблюдения событий по местному времени (magnetic local time, MLT). В распределении выделяют два пика: главный, утренний, и значительно меньший вечерний. Для утреннего пика свойственны меньшие периоды и более высокие амплитуды по сравнению с вечерним [Gupta, 1975]. Кроме того, утренний пик сильнее выражен на более низких, по сравнению с вечерним, широтах. Также в авроральной зоне в районе полуночи существует еще один пик частоты наблюдения пульсаций. В исследованиях, основанных на спутниковых данных, также отмечается наличие так называемой утренне-вечерней асимметрии распределения пульсаций, в частности пик в области 0800–1000 MLT [Kokobun, 1985; Takahashi et al., 1984].

Для пульсаций Pc5 ярко выражена зависимость направления вращения вектора поляризации как от местного времени, так и от широты: оно меняется при переходе через область 1200–1400 MLT, а также при переходе от более низких широт к более высоким. Точка изменения вращения находится в области максимума амплитуд, в авроральной зоне [Samson et al., 1971].

Для объяснения происхождения устойчивых пульсаций Pc5, как и для части пульсаций с более короткими периодами, был предложен механизм возбуждения резонансных тороидальных колебаний силовых линий [Chen, Hasegawa, 1974a; Southwood, 1974]. В соответствии с ним, БМЗ-моды распространяются внутрь магнитосферы и преобразуются в стоячие альфвеновские волны на замкнутых силовых линиях. При этом, каждая силовая линия характеризуется своим набором частот собственных колебаний, зависящим от ее длины, интегральных величин магнитного поля и концентрации частиц вдоль нее. В соответствии с этой моделью, во внешней магнитосфере, где длина силовых линий больше, и на высоких широтах, куда проецируются основания этих линий, частоты колебаний ниже, так как поперечной волне требуется больше времени, чтобы распространиться от одного основания линии до другого.

В качестве источника пульсаций Pc5 чаще всего рассматривают неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, развивающуюся на магнитопаузе под воздействием набегающего потока солнечного ветра [Lee et al., 1981]. БМЗ-колебания, генерирующиеся неустойчивостью, распространяются внутрь магнитосферы и возбуждают резонанс силовых линий [Southwood, 1974]. Эта гипотеза объясняет особенности поляризации волн в магнитосфере, а также их направление распространения преимущественно от Солнца [Olson, Rostoker, 1978]. Кроме того, в рамках этой модели в работе [Lee et al., 1981] было предложено объяснение утренне-вечерней асимметрии: порог развития неустойчивости на магнитопаузе зависит от местного времени MLT; на утренней стороне он ниже из-за того, что поле переходной области там слабее. В результате, пульсации наблюдаются там чаще. Характерно, что ассимитричное распределение относительно полуденного меридиана свойственно только для пульсаций, связанных с резонансом силовых линий [Baker et al., 2003]. В работе [Rostoker, Sullivan, 1987] обнаружено, что в вечернем секторе авроральной зоны пульсации преимущественно наблюдаются в период направленной на север  $V_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля. Авторы работы [Baker et al., 2003] в свою очередь показали, что это справедливо для всех секторов MLT. Возрастающая вероятность регистрации колебаний при увеличении скорости солнечного ветра также согласуется с теорией о неустойчивости Кельвина–Гельмгольца как об их источнике [Nosé et al., 1995].

Среди других источников резонанса силовых линий — волны в солнечном ветре, которые могут проникать через магнитопаузу в магнитосферу без существенного изменения спектра [Мазур, 2010; Greenstadt et al., 1983]; периодические изменения динамического давления солнечного ветра, вызывающие поверхностные волны на магнитопаузе, которые в свою очередь генерируют альфвеновские волны [Sibeck et al., 1989], или модулирующие скорость пересоединения силовых линий [Le et al., 2004]. Авторы работ [Kessel, 2008; Takahashi, Ukhovskiy, 2007, 2008] называют основным источником пульсаций (включая БМЗ-волны и альфвеновский резонанс силовых линий) колебания давления солнечного ветра в диапазоне пульсаций Pc5.

Во многих работах [напр., Kivelson et al., 1984, Samson et al., 1992] обращается внимание на то, что нередко частоты колебаний представляют собой ряд устойчивых дискретных значений (1,3; 1,9; 2,6; 3,4 мГц). Этот факт выглядит необычно с учетом того, что размер, концентрация частиц и другие параметры магнитосферы не остаются постоянными и дискретными, а изменяются в зависимости от уровня геомагнитной активности. В качестве объяснения была предложена гипотеза о том, что магнитосфера обладает набором частот собственных колебаний и в ответ на внешние импульсы колеблется как единое целое. Так называемая глобальная волноводная мода ограничивается с одной стороны магнитопаузой (или ударной волной [Harrold, Samson, 1992]), с другой — плазмопаузой. Таким образом, магнитосфера представляет собой единый резонатор [Kivelson, Southwood, 1985, Леонович, Мазур, 2008]. Авторы работ [Samson et al., 1992; Walker et al., 1992] преобразовали модель резонатора, представив магнитосферу в виде волновода, закрытого с одной, подсолнечной, стороны и имеющего неограниченную длину с другой. В работе показано, что такая модель также согласуется с наблюдаемыми дискретными частотами.

Модель глобальной волноводной моды объясняет редкость наблюдения в наземных данных зависимости частоты колебаний от широты [McDiarmid, Allan, 1990]. Однако при этом не все авторы обнаруживают наличие устойчивых дискретных частот. Авторы работы [Ziesolleck, McDiarmid, 1995] показали, что характерные дискретные частоты наблюдаются на разных широтах одновременно, однако указали на то, что они не являются устойчивыми. В исследовании предложено три других набора частот, которые наблюдаются при разных условиях в межпланетной среде. Один из этих наборов соответствует распределению частот, наблюдаемых в работе [Chisham, Orr, 1997]. Авторы статьи [Mathie et al., 1999] также показали, что дискретные частоты, вероятно, не являются устойчивыми. Кроме того, обнаруживаются свидетельства того, что устойчивые пики в спектре волн не формируются внутри магнитосферы, а присутствуют в колебаниях плотности солнечного ветра [Kerko et al., 2002; Viall et al., 2009]. Таким образом, вопрос устойчивых

дискретных частот не является до конца решенным и требует дальнейшего изучения.

Помимо источников волн, имеющих немагнитосферное происхождение, существует ряд процессов, вследствие которых колебания могут быть возбуждены внутри магнитосферы. Обычно это неустойчивости в плазме. Наиболее часто в качестве источников пульсаций упоминаются дрейфово-баунсовая и дрейфово-зеркальная неустойчивости. Они развиваются при попадании в магнитосферу энергичных частиц, обычно во время суббурь [Glassmeier et al. 1999]: дрейфово-зеркальная неустойчивость возникает в условиях неоднородной плазмы с высоким значением  $\beta$ , когда поперечное давление частиц становится велико [Hasegawa, 1969]. Также колебания могут возбуждаться переменными токами, связанными с движением в магнитосфере облаков заряженных частиц [Золотухина, 1974; Магер, Климушкин, 2007; Zolotukhina et al., 2008]. Как и волны из внешних источников, такие потоки частиц могут возбуждать резонанс силовых линий на соответствующих их частоте магнитных оболочках.

Среди волн с большими азимутальными волновыми числами в диапазоне  $Pc5$  можно выделить отдельный класс компрессионных колебаний. Такие колебания преимущественно наблюдаются в ночной магнитосфере, особенно в вечернем секторе [Rae et al., 2007]. Они являются наиболее часто наблюдаемыми пульсациями на дальних магнитных оболочках, со значениями  $L > 8$ , и при этом наблюдаются существенно реже во внутренней магнитосфере [Anderson et al., 1990; Takahashi et al., 1990]. Одновременно с компрессионной компонентой возмущения часто наблюдается и радиальная. Характерной особенностью компрессионных волн является то, что колебания величины магнитного поля и давления частиц происходит в противофазе. Волны, наблюдающиеся в предполуночном и послеполуночном секторах различаются по свойствам. Первые регистрируются в возмущенных геомагнитных условиях при развившемся кольцевом токе [Woch et al., 1990]. Они обычно распространяются на запад [Walker et al., 1982]. Для волн послеполуночного сектора характерно направление распространения на восток, а также более

высокие частоты (5 мГц и выше) [Takahashi et al. 1990]. Компрессионные волны обычно наблюдаются в анизотропной плазме со значительной поперечной компонентой давления [Kremser et al., 1981]. В качестве их источника часто обсуждается дрейфово-зеркальная неустойчивость. Для ее возникновения требуется, чтобы поперечное давление плазмы было выше продольного, в особенности в случае малых величин отношения магнитного и плазменного давления  $\beta$  [Chen, Hasegawa, 1991]. Выполнение этого условия маловероятно во внутренней магнитосфере [Wang et al., 2013]. Помимо дрейфово-зеркальной моды, компрессионные колебания связывают с медленной магнитоакустической модой [Leonovich et al., 2006] — вывод, исходящий из использования уравнений магнитогидродинамики. Однако макроскопический подход может быть неподходящим для горячей бесстолкновительной плазмы, требующей рассмотрения в рамках кинетики [Hurricane et al., 1994].

Помимо перечисленного выше, часть пульсаций Pc5 может быть идентифицирована как дрейфово-компрессионная мода [Rosenbluth, 1981]. Эта мода может быть возбуждена благодаря неустойчивости при наличии градиента концентрации горячей плазмы поперек магнитных оболочек [Crabtree, Chen, 2004; Klimushkin, Mager, 2011] или инверсного распределения горячих протонов [Mager et al., 2013]. В этом случае для развития неустойчивости не требуется анизотропия частиц. В работе [Klimushkin et al., 2012b] показано, что при учете кривизны силовых линий дрейфово-компрессионная мода может сцепляться с альфвеновской, образуя дрейфово-баллонную моду. Подобный случай показан в статье [Mager et al., 2015]. Дрейфово-компрессионная мода близка по частоте к диамагнитной, но не совпадает с ней [Klimushkin, Mager, 2011; Mager et al., 2013; Naim et al., 2014]. Характерной особенностью дрейфово-компрессионной моды является зависимость ее частоты от волнового числа  $m$ . В работе [Костарев, Магер, 2017] показано, что дрейфово-компрессионные волны, помимо взаимодействия с протонами, могут также испытывать усиление в результате резонансного взаимодействия с электронами, дрейфующими в дипольном поле Земли на восток.

С шестидесятых годов XX века для изучения УНЧ-волн используются радары [Walker, Greenwald, 1980]. Колебания магнитного поля регистрируются ими опосредованно, через измерения доплеровских сдвигов частоты рассеянного на ионосферной плазме сигнала; колебания скорости плазмы в свою очередь вызваны модуляцией электрического поля. Радары показали высокую эффективность в исследованиях пространственной структуры магнитосферных пульсаций и со временем получили широкое применение в этой области. Они являются источником данных с более высоким по сравнению с наземными магнитометрами пространственным разрешением. В особенности преимущества использования радаров значимы для колебаний с большими азимутальными волновыми числами, которые затруднительно регистрировать с помощью наземных магнитометров из-за высокой степени экранирования ионосферой [Yeoman et al., 2012]. По данным работы [Ponomarenko et al., 2003], в которой использовались наблюдения среднеширотного радара TIGER, 46% волн, регистрируемых с помощью радара, никак не проявляются в данных наземных магнитометров.

Одними из первых для регулярных исследований УНЧ-колебаний стали использоваться радары системы STARE (Scandinavian Twin Auroral Radar Experiment) [Nielsen, 1982]. Они принимают рассеянный сигнал с площади примерно  $160\,000\text{ км}^2$  из E-слоя ионосферы с пространственным разрешением около 20 км. Благодаря перекрытию поля обзора двух радаров, производящих сканирование в разных направлениях, исследователи получают данные об обеих горизонтальных компонентах скорости плазмы. С помощью этой системы радаров была исследована структура стоячих альфвеновских волн [Walker et al., 1979], и было показано совпадение экспериментальных данных с теорией, разработанной в статьях [Southwood, 1974; Chen, Hasegawa, 1974a, 1974b]: был показан поворот горизонтальной составляющей возмущения магнитного поля на  $90^0$  при переходе через ионосферу и сдвиг фазы на  $180^0$  при переходе через широту максимума волны.

Система ВЧ (высокочастотных) радаров SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) в исследовании конвекции ионосферы и других областях стала преемником STARE [Greenwald et al., 1995]. Ее преимущество заключается в

использовании данных о рассеянии на неоднородностях F-слоя ионосферы. Это дает возможность избежать необходимости учитывать такие явления, как затухание и поворот поляризации волны на  $90^0$  при прохождении E-слоя [Hughes, Southwood, 1976]. На высотах F-слоя электроны и ионы под воздействием электрического поля движутся с примерно одинаковой скоростью, что упрощает интерпретацию данных [Chisham et al., 2007]. Использование многоскачковых трасс позволяет получать рассеянный сигнал с больших расстояний, до нескольких тысяч километров от радара.

Многие исследования УНЧ-волн, проводившиеся с помощью ВЧ радаров, были проведены с использованием данных SuperDARN. Радары этой сети, обычно сканирующие поле обзора в течение 2 минут, предоставляют возможность увеличить временное разрешение за счет ограничения площади, с которой принимается сигнал рассеяния. Таким образом, возможно эффективное изучение длиннопериодных пульсаций, включая колебания диапазонов Pc3–Pc5. С помощью радаров SuperDARN были исследованы пространственные характеристики волн этого диапазона [Baker et al., 1998] и их источники в высоких широтах [Matsuoka et al. 2002]. В работе [Ruohoniemi et al. 1991] было показано наличие дискретного набора частот колебаний в поле обзора радара, каждая из которых имеет максимальную мощность на своей широте, что свойственно для альфвеновского резонанса силовых линий; в работе [Samson et al. 1991] показана связь проявления волновой активности в диапазоне Pc5 и формирования авроральных дуг типа «с».

С помощью данных SuperDARN подробно изучалась связь магнитосферных пульсаций с электромагнитными волнами и колебаниями давления в солнечном ветре. В работе [Rae et al., 2004] показан случай наблюдения колебаний скорости ионосферной плазмы в диапазоне Pc5 в области каспа, которые посредством модуляции скорости пересоединения генерировались альфвеновскими волнами в солнечном ветре. В работах [Prikryl et al., 1998, 2002] в отношении стоячих альфвеновских волн на замкнутых силовых линиях, наблюдавшихся экваториальнее каспа, также выдвинуто предположение об их прямой связи с альфвеновскими волнами в солнечном ветре. Авторы работы [Stephenson, Walker, 2002] провели сравнение колебаний

в солнечном ветре и в ионосфере, показав наличие сходных спектральных пиков, подтверждающих возможность генерации колебаний на замкнутых силовых линиях напрямую волнами в солнечном ветре.

Возможности радаров SuperDARN в изучении пространственной структуры волн позволяют проводить детальное сравнение колебаний с малыми и большими азимутальными волновыми числами. В работе [Fenrich et al., 1995] представлено сравнение двух видов волн на основе анализа данных радаров. Показано, что волны с большими и малыми  $m$  различаются по морфологическим свойствам, долготным секторам наблюдений и направлению распространения, однако характеризуются сходными превалирующими частотами. На основе этих наблюдений авторы заключают, что волны с большими и малыми  $m$  могут иметь одни и те же источники. При этом, в случае волн с большими  $m$  энергичные частицы, инжектированные в магнитосферу, могут играть роль скорее в усилении волн, чем в их генерации. Позже эти же авторы в работе [Fenrich, Samson, 1997] показали, что источником волн с большими азимутальными волновыми числами является БМЗ-мода, распространяющаяся по магнитосферному волноводу, в то время, как волны с большими азимутальными волновыми числами получают энергию от внутримангнитосферного источника, вероятно, от взаимодействия волн с частицами. Сами стоячие альфвеновские волны с большими  $m$  в свою очередь являются источником энергии для БМЗ. Однако последовательной теории, объясняющей схожесть наиболее часто наблюдаемых частот для двух видов волн, по всей видимости, не существует.

В дальнейшем радары SuperDARN продолжали играть важную роль в исследовании деталей взаимодействия энергичных частиц с волнами. В работе [Yeoman, Wright, 2001] показан случай наблюдения в послеполуденном секторе одновременно трех волн, две из которых имели мелкомасштабную структуру в азимутальном направлении и являлись основной и второй гармониками стоячей альфвеновской волны. Источником энергии этих двух волн было инверсное распределение ионов в диапазоне энергий 30–50 кэВ. При этом первая волна взаимодействовала с частицами посредством дрейфового резонанса, а вторая — посредством дрейфово-баунсового резонанса. В работе

[Baddeley et al., 2002] показан случай наблюдения волны с  $m \sim -45$  в утреннем секторе ионосферы, проводившегося с использованием нагревного стенда в Тромсё. В области силовых линий, на которых наблюдались колебания, с помощью спутника Polar было обнаружено инверсное распределение частиц в диапазоне энергий 8–15 кэВ. Анализ условий дрейфово-баунсового резонанса показал, что волна наблюдалась в результате дрейфово-баунсового взаимодействия второй гармоники альфвеновского резонанса и облака частиц с неустойчивым распределением по энергиям.

Среднеширотные радары начали использоваться для изучения электромагнитных пульсаций сравнительно недавно [Ponomarenko et al., 2003; Nishitani et al., 2019]. Во время суббурь данные среднеширотных радаров в меньшей степени подвержены ухудшению, связанному с поглощением сигнала и изменением условий распространения из-за высыпаний в D- и E-слои ионосферы [Gauld et al. 2002], поскольку в этом случае сигнал попадает в ионосферу экваториальнее авроральной зоны. Кроме того, расположение области, в которой регистрируется сигнал, отраженный от земной поверхности, меньше зависит от геомагнитных условий.

В работе [Mager et al., 2015] на основе данных Екатеринбургского среднеширотного радара показан случай сцепления двух волн, частоты которых изначально различались, но с ростом азимутального волнового числа стали близки. Авторы предполагают, что эти две ветви колебаний представляли собой альфвеновскую и дрейфово-компрессионную моды, которые в условиях кривизны силовых линий и неоднородности плазмы при превышении числа  $m$  определенного порогового значения испытали преобразование в дрейфово-баллонную моду [Klimushkin et al. 2012].

В целом, растущее количество радаров обеспечивает постоянно увеличивающийся темп роста объема данных о наблюдениях УНЧ-волн. Однако при этом зачастую не удается установить очевидной связи экспериментальных данных с существующими теоретическими исследованиями. Соотнесение наблюдений электромагнитных пульсаций с определенными типами мод и установление их природы и источников

является важным шагом к пониманию процессов, протекающих в магнитосфере.

Екатеринбургский радар, данные которого использовались в упомянутом выше исследовании, расположен на территории обсерватории Арти вблизи Екатеринбурга. Он сходен с радаром системы SuperDARN и предназначен для исследования процессов конвекции в ионосфере и динамики системы ионосфера-магнитосфера. В данной работе использованы результаты наблюдений, полученные на этом радаре. Во время проведения эксперимента в одном из каналов регистрировались данные, получаемые на трех соседних лучах с временным разрешением 18 с.

## **Глава 2. Методы проведения исследования УНЧ-колебаний с помощью Екатеринбургского радара**

В главе представлены сведения об инструментах, с помощью которых были получены данные, использовавшиеся в работе. Для проведения исследования на Екатеринбургском радаре использовался специальный режим работы, позволяющий получить увеличенное временное разрешение на трех соседних лучах, направленных примерно в сторону геомагнитного полюса. Описаны особенности получения данных, в том числе отделение сигнала, рассеянного на земной поверхности, от сигнала, рассеянного на ионосфере. Приведена информация о других использованных инструментах. Описаны методика обработки данных, полученных на радаре, с помощью вейвлет-анализа, определение азимутального волнового числа по данным, полученным вдоль соседних лучей, а также оценка частоты стоячей альфвеновской волны на заданной магнитной оболочке по данным спутников.

### **2.1. Используемые инструменты и получение наблюдательных материалов**

В ходе работы использовались данные, полученные на Екатеринбургском когерентном радаре коротковолнового диапазона [Berngardt et al., 2015]. Радар расположен вблизи Екатеринбурга (56.5N, 58.5E). Он является частью центра

коллективного пользования «Солнечно-земная физика и контроль околоземного космического пространства» (ЦКП «Ангара»). Излучаемый антеннами радара сигнал рассеивается неровностями земной поверхности, а также мелкомасштабными (порядка десятков метров) неоднородностями E- и F-слоев ионосферы, вытянутыми вдоль силовых линий магнитного поля [Ruohoniemi et al., 1987]. По параметрам сигнала обратного рассеяния можно определить характеристики ионосферы в точке отражения. Так, доплеровское смещение рассеянного сигнала по частоте обусловлено скоростью движения неоднородности в радиальном направлении, то есть в направлении от или к радару. Угол обзора радара составляет 50 градусов, в пределах которых антенная система в штатном режиме последовательно переключается между 16 азимутальными направлениями, или лучами (рис. 3). Время работы на одном направлении составляет 6 секунд, один цикл сканирования всех лучей занимает 96 секунд, что обуславливает временное разрешение данных в этом режиме: каждый луч сканируется антеннами примерно один раз в полторы минуты.

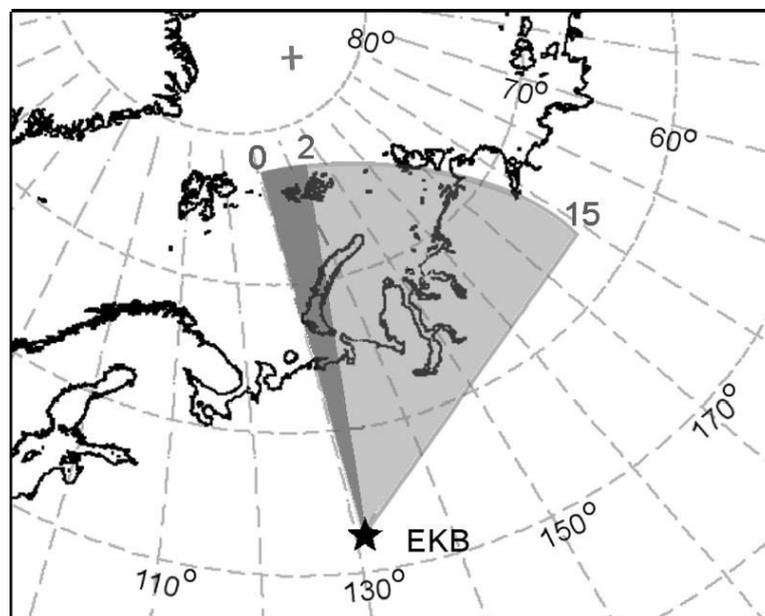


Рисунок 3. Поле обзора Екатеринбургского радара в геомагнитных координатах. Номерами показано расположение лучей. Темно-серая область соответствует лучам с высоким временным разрешением. Крестом отмечен географический полюс.

Для получения данных с более высоким временным разрешением используется режим с дополнительной последовательностью сканирования лучей. Во время проведения эксперимента производилось сканирование трех расположенных рядом, западных лучей (0–2). Время работы на одном луче составляло те же 6 секунд, но уменьшение количества сканируемых направлений привело к увеличению временного разрешения до 18 секунд на каждый луч. Такой режим работы позволяет получать данные о колебаниях скорости плазмы с периодами 36 секунд и больше. Луч 0, самый западный из "высокочастотных", направлен примерно в сторону магнитного полюса. Направления лучей 1 и 2 отклоняются от магнитного меридиана примерно на 3,3 и 6,6 градуса соответственно. Луч 2 направлен примерно на географический полюс.

Радар регистрирует сигналы обратного рассеяния с расстояний до 3500 км. Разрешение по дальности составляет 45 км. По принадлежности точки отражения к определенному диапазону определяется расстояние до нее от радара. Граница первого диапазона находится в 180 км от радара. Таким образом, вдоль лучей с высоким временным разрешением радар принимает сигнал из диапазона  $54\text{--}78^{\circ}$  геомагнитной широты (магнитные координаты вычислены по модели AACGM [Shepherd, 2014]). Рабочая частота радара была  $\sim 10.5$  МГц.

Одной из важных задач при работе с данными радара является разделение сигналов, рассеянных на земной поверхности и на неоднородностях ионосферы. Первые соответствуют возвратно-наклонному зондированию, они испытывают отражение от ионосферы на пути в обе стороны между антенной и точкой рассеяния. Такой путь сигнала представляет собой так называемую односкачковую моду. Параметры рассеянного на земной поверхности сигнала подвержены влиянию перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВов) и могут быть использованы для изучения их свойств [Samson et al., 1989] и для зондирования ионосферы [Hughes et al., 2002]. Сигнал пол- и полутораскачковой моды — это обратное рассеяния на ионосферных неоднородностях. В первом случае излучаемый и рассеянный сигнал не испытывает отражений, во втором излучаемый сигнал отражается сначала от

ионосферы, затем от земной поверхности, а рассеянный — в обратном порядке. Такой путь радиоволн позволяет получать информацию об удаленных от антенной решетки неоднородностях ионосферы.

Для отделения сигнала, рассеянного на земной поверхности, от сигнала, рассеянного в ионосфере используются пороговые значения величин доплеровской скорости и спектральной ширины. Для Екатеринбургского радара считается, что сигнал с превышением обеих величин значения 25 м/с относится к ионосферному рассеянию. Некоторые авторы предлагают более сложные выражения для определения типа сигнала для подобных радаров [Blanchard et al., 2009; Ribeiro et al., 2011]. Стоит отметить, что оценка сигнала по величине доплеровской скорости и спектральной ширине зачастую классифицирует сигнал, рассеянный на ионосферных неоднородностях, имеющих низкую скорость, как рассеянный на земной поверхности.

Рассеянными сигналами свойственно группироваться по модам на плоскости радиальное расстояние–время в виде вытянутых вдоль оси времени полос. Эта особенность дополнительно используется для разделения разных типов сигнала [напр., Cousins and Shepherd 2012; Ribeiro et al., 2011]. В данных Екатеринбургского радара сигналу, рассеянному на земной поверхности, свойственна особая зависимость дальности от времени, которая хорошо описывается в модельном приближении плавно неоднородной ионосферы [Бернгардт и др., 2015]. В ночной ионосфере рассеяние на земной поверхности наблюдается на расстояниях более 1500 км от радара. Эта особенность используется в данной работе для выделения сигнала ионосферного рассеяния. На рис. 4 показан пример полученного на радаре обратного рассеяния с областью рассеянного земной поверхностью сигнала.

Помимо Екатеринбургского радара в исследовании использовались данные пары спутников RBSP (Radiation Belt Storm Probes) миссии Van Allen Probes и двух спутников THEMIS, D и E (THD и THE). При движении по высокой эллиптической орбите от апогея в 30,5 тысяч километров (RBSP) и 88 тысяч километров (THEMIS) к перигею в 500 километров (RBSP) и 1000 километров (THEMIS) спутники пересекают широкий диапазон магнитных оболочек, давая возможность получать данные о зависимости параметров

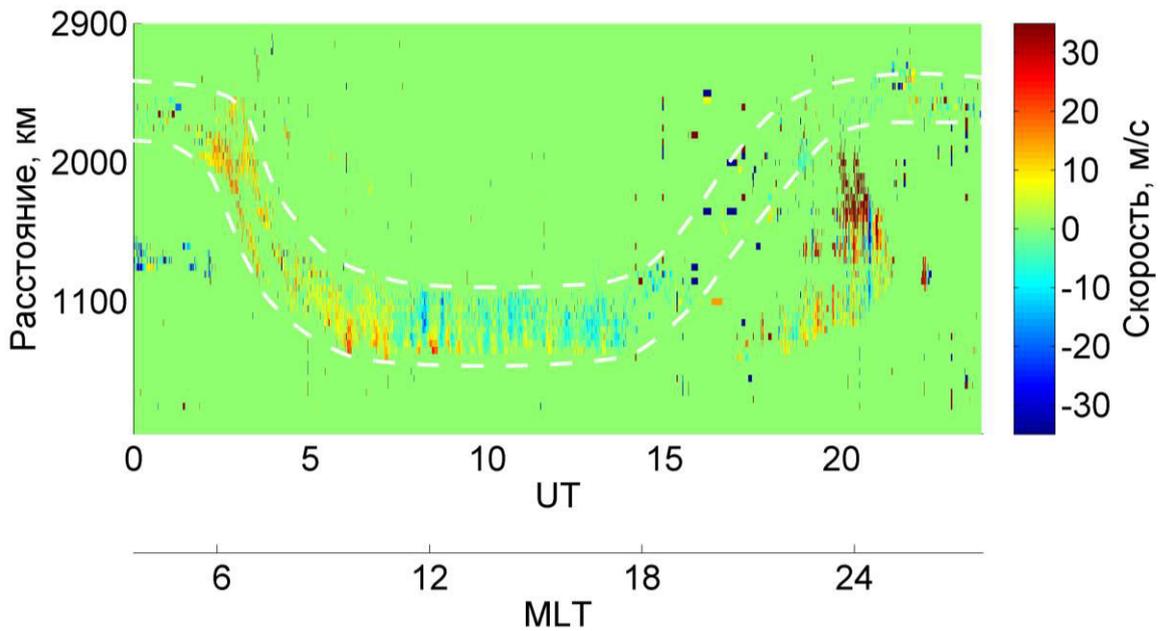


Рисунок 4. Сигнал, полученный на Екатеринбургском радаре 14 марта 2015 г., луч 0. Область сигналов, рассеянных земной поверхностью отмечена пунктирными линиями.

плазмы и магнитного поля от расстояния до Земли в определенном долготном секторе. На спутниках RBSP использовались данные инструментов Electric Field and Waves Suite (EFW) для определения плотности частиц по электростатическому потенциалу спутника и EMFISIS для определения вектора напряженности магнитного поля. Чувствительность прибора EFW соответствует измерению концентрации плазмы в диапазоне  $0,1\text{--}100\text{ см}^{-3}$  с временным разрешением 1 с. EMFISIS производит измерение магнитного поля в диапазоне  $0,02\text{--}65536\text{ нТл}$  с чувствительностью от  $0,001$  до  $2\text{ нТл}$ . На спутниках THEMIS использовались инструменты ESA для определения плотности частиц и магнитометры FGM. Диапазон измерения ESA — от  $6\text{--}7\text{ эВ}$  до  $25\text{ кэВ}$ , FGM производит измерения магнитного поля в диапазоне от  $0,1$  до  $25000\text{ нТл}$  с временным разрешением около 3 с.

## 2.2. Методы обработки данных

Мелкомасштабные колебания скорости ионосферных неоднородностей в радарных данных являются реакцией ионосферы на поле УНЧ-волн в магнитосфере. Считается, что изменения скорости ионов прямо пропорциональны электрическому полю волны, поскольку ее магнитное поле мало по сравнению с фоновым магнитным полем Земли [Wright, Yeoman, 1999; Yeoman et al., 2012; Bland et al., 2014]. Колебания скорости плазмы с амплитудой 100 м/с соответствуют электрическому полю волны порядка 5 мВ/м. При анализе волн, помимо данных о скорости плазмы, используются данные о мощности принятого сигнала. Наличие наблюдающихся одновременно с колебаниями скорости колебаний мощности сигнала связывают с изменениями электронной концентрации в ионосфере, которые приводят к дополнительному рассеянию [Stocker et al., 2000; Frissell et al., 2014; Ponomarenko et al., 2009], а также к изменению параметров рассеяния сигнала на ионосферных неоднородностях [Uspensky et al., 1994]. В отсутствие колебаний мощности сигнала считается, что причиной периодических изменений скорости плазмы являются вариации  $E \times B$  дрейфа [Bland et al., 2014; Ponomarenko et al., 2003; Yeoman et al., 2000; Walker et al., 1992]. Ориентация лучей высокого разрешения примерно вдоль магнитного меридиана обуславливает поляризацию наблюдаемой компоненты возмущения: поскольку направление дрейфа плазмы в скрещенных магнитном и электрическом полях перпендикулярно направлению электрического поля, меридиональная компонента скорости частиц зависит от азимутальной компоненты электрического поля, которая, в свою очередь, соответствует радиальной компоненте возмущения магнитного поля.

Обработка данных, полученных на радаре, включающая интерполяцию, фильтрацию и кросс-вейвлет анализ проводилась с помощью программ, написанных на языке программирования MATLAB. На первом этапе в процессе визуального изучения выявлялись случаи наблюдения устойчивых колебаний. Было обнаружено 39 таких случаев. В рамках части из них наблюдалась только

одна колебательная гармоника, другие случаи характеризуются более сложной структурой колебаний: одновременно, либо близко по времени наблюдались две или три колебательные гармоники с разными частотами. Колебания бывают видны в нескольких диапазонах дальности, от 1 до 8–10. Для дальнейшей обработки отбирались данные из тех диапазонов, в которых у колебаний была максимальная амплитуда, и в рядах было наименьшее количество пропусков. По этому же принципу выбирались лучи: использовались данные пары соседних лучей с меньшим количеством пропусков. Использование в кросскорреляционном анализе данных пары лучей вместо одного позволяет минимизировать влияние шумов и оценить пространственную структуру волн в азимутальном направлении.

К отобраным для дальнейшей обработки рядам данных применялась интерполяция с целью уравнивать временные промежутки между отсчетами. Затем использовался фильтр верхних частот с частотой среза 1,7 мГц, соответствующей нижней границе частотного диапазона Рс5. Для дальнейшей обработки рядов данных использовался вейвлет-анализ.

Вейвлет-преобразование представляет собой поочередное разложение в ряд Фурье участков одномерного сигнала, обеспечивающее двумерную развертку по частоте и пространственной или временной координате [Астафьева, 1996]. Для обработки данных применялось вейвлет-преобразование Морле, в котором в качестве вейвлета используется плоская волна, модулированная гауссианом [Grossman, Morlet, 1984; Foster, 1996]:

$$W(\omega, \tau) = \sqrt{\omega} \sum_{j=1}^N x(t_j) e^{i\omega(\tau-t_j) - (\tau-t_j)^2 / 2T^2}, \quad (1.1)$$

где  $\omega$  — циклическая частота,  $\tau$  — смещение по времени,  $x(t_j)$  — значения сигнала в дискретные моменты времени  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $T$  — период, равный  $2\pi/\omega$ . Для получения спектра колебаний использовалась амплитудная вейвлет-функция

$$F(\omega, \tau) = \frac{2|W|}{\sqrt{\omega n(\omega, \tau)}}, \quad (1.2)$$

где нормирующий коэффициент

$$n(\omega, \tau) = \sum_{j=1}^N e^{-(\tau-t_j)^2/2T^2}. \quad (1.3)$$

Амплитудная вейвлет-функция показывает, какова мощность отдельных колебательных компонент и описывает их вклад в исходный сигнал. Так, для синусоидального сигнала значение функции равно ее амплитуде. Поскольку, как говорилось выше, для каждого случая использовались данные пары соседних лучей, в анализе применялась взаимная мощность двух сигналов:

$$F_{01}(\omega, \tau) = F_0(\omega, \tau)F_1(\omega, \tau), \quad (1.4)$$

где  $F_0(\omega, \tau)$  и  $F_1(\omega, \tau)$  — амплитудные вейвлет-функции сигналов.

Важным преимуществом вейвлета Морле является то, что он комплексный. Благодаря этому он дает возможность вычислять разность фаз сигналов как функцию частоты и времени. Для этого использовалось кросс-вейвлет преобразование:

$$W_{01}(\omega, \tau) = W_0(\omega, \tau)W_1^*(\omega, \tau), \quad (1.5)$$

где  $W_1(\omega, \tau)$  и  $W_2(\omega, \tau)$  — вейвлет-преобразования для сигналов, полученных на двух соседних лучах, знак \* обозначает комплексно-сопряженную величину. Разность фаз сигналов вычисляется по формуле

$$\Delta\varphi(\omega, \tau) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(W_{01}(\omega, \tau))}{\text{Re}(W_{01}(\omega, \tau))}\right), \quad (1.6)$$

Зная разность долгот точек рассеяния воль двух лучей  $\Delta\lambda$ , можно вычислить азимутальное волновое число:

$$m = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}. \quad (1.7)$$

Следует отметить, что в методе получения радаром данных заложена систематическая ошибка: поскольку точная высота области рассеяния сигнала

неизвестна, неточность определения ее положения в радиальном направлении может достигать 200 км. Соответствующая величина ошибки определения расстояния между областями рассеяния вдоль соседних лучей может достигать 10 км. В результате, эта ошибка применительно к вычислению азимутального волнового числа может достигать 25%.

Для анализа параметров наблюдаемых колебаний определялись области на плоскости частота–время, где взаимная мощность имеет локальные максимумы. Поскольку амплитуды волн разнятся от случая к случаю (колебания скорости ионосферной плазмы в отдельные даты превышают 200 м/с) и уровень шумов не является неизменным, пороговые значения величины взаимной мощности для каждого случая подбирались индивидуально. Учитывая ограничения, которые накладывает вейвлет-анализ на минимальную ширину оконной функции, для анализа отбирались только колебательные гармоники длительностью в три периода и больше.

Для статистической обработки результатов измерений каждой колебательной гармонике ставилось в соответствие одно значение частоты, определенное в максимуме. Этот метод обусловлен ограниченным спектральным разрешением преобразования: как и в случае оконного преобразования Фурье, оно обратно пропорционально временному разрешению, то есть ширине оконной функции. Для колебаний с периодами 150–600 секунд спектральное разрешение находится в пределах 0,6–2,2 мГц. В большинстве случаев отклонение частоты колебаний за время их наблюдений не превышает нескольких десятых долей миллигерца и недостаточно велико для его разрешения. Значение частоты, соответствующей колебательной гармонике, определялось в момент времени, когда колебания обладали максимальной амплитудой, то есть в точке максимального значения взаимной мощности. Подобным образом определялись и значения азимутального волнового числа.

Знак азимутального волнового числа связан с направлением распространения волны: распространяющиеся на восток волны имеют положительные  $m$ , а на запад — отрицательные. Чтобы уточнить направление распространения волны и исключить ошибку смещения сигнала на  $2\pi$ ,

применяется кросскорреляционный анализ. Для случая, в котором индекс 1 относится к лучу, расположенному западнее, огибающая корреляционной функции

$$c_{1,2}(\tau_j) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-j-1} x_1(t_{n+1})x_2(t_{n+j+1}), & j \geq 0 \\ c_{2,1}(-j), & j < 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

имеет максимум в области отрицательных  $\tau$  в случае положительного азимутального волнового числа и в области положительных  $\tau$ , если  $m$  отрицательное. Здесь  $\tau_j$  — смещение по времени на дискретные значения,  $j = -N, \dots, 0, \dots, N$ , где  $N$  — количество значений в рядах  $x(t)$ . При этом разность фаз сигналов на двух лучах

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\tau_{max}}{T}, \quad (1.9)$$

где  $\tau_{max}$  — смещение по времени между двумя сигналами, соответствующее максимуму корреляционной функции.

Помимо определения характеристик волн в азимутальном направлении, данные радара также дают возможность отследить изменение их параметров поперек магнитных оболочек. Для этого сравнивается сигнал рассеянный на неоднородностях ионосферы на разных широтах вдоль одного луча. Поскольку лучи с возможностью получения данных с высоким временным разрешением направлены примерно вдоль магнитного меридиана, разность фаз волны на двух точках вдоль луча отражает радиальную компоненту скорости распространения и позволяет вычислить радиальное волновое число:

$$k_r = \frac{2\pi\Delta\varphi_x}{\Delta L}, \quad (3.1)$$

где  $\Delta\varphi_x$  — разность фаз волны вдоль одного луча на разных широтах, которым соответствуют номера магнитных оболочек  $L_1$  и  $L_2$ , а

$$\Delta L = L_2 - L_1. \quad (3.2)$$

Во многих случаях регистрации волн разность фаз на разных широтах слишком мала по сравнению с временным разрешением, поэтому эту величину

зачастую затруднительно оценить. По этим же причинам погрешность определения  $\Delta\varphi_x$  и вычисления  $k_r$  велика и составляет 20–40% величины.

В работе, помимо определения характеристик колебаний по данным радара, проведено сравнение частот волн с частотами резонансных альфвеновских колебаний на данной магнитной оболочке. Альфвеновская частота была оценена на основе измерений магнитного поля и плотности частиц в магнитосфере по данным спутников RBSP и THEMIS. Такое сравнение с альфвеновскими частотами силовых линий возможно для тех случаев, в которых вблизи сектора регистрации радаром волн в промежуток времени, близкий ко времени наблюдений, спутники, по данным которых можно оценить альфвеновскую частоту, пересекали магнитные оболочки, на которых происходили колебания. В случае, если условию удовлетворяли два спутника, выбирался тот, который находился ближе к радару по долготе.

При вычислении частоты собственных колебаний использовалось приближение дипольного магнитного поля и степенной закон распределения частиц вдоль силовой линии  $n \sim r^{-\alpha}$ , где  $r$  — геоцентрический радиус-вектор. Альфвеновская скорость может быть представлена в виде

$$A(L, \theta) = A_{eq}(L) f_A(\theta), \quad (2.1)$$

где  $\theta$  — магнитная широта,

$$f_A(\theta) = \frac{\sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta}}{\cos^{6-\alpha} \theta}, \quad (2.2)$$

и  $A_{eq}$  — альфвеновская скорость на экваторе:

$$A_{eq}(L) = \frac{A_s}{f_A(\theta_s)}, \quad (2.3)$$

где  $A_s$  — альфвеновская скорость, определенная по данным спутника, а  $\theta_s$  — его магнитная широта. Имея возможность оценить альфвеновскую скорость в любой точке силовой линии, можно вычислить частоту основной гармонике собственных колебаний. То, что значение индекса  $\alpha$  точно не известно, вносит некоторую неопределенность в расчеты, однако его изменение в пределах 2–4

меняет значение альфвеновской частоты не более чем на 5 %, и не оказывает существенного влияния на результаты анализа.

При расчетах учитывалось, что частицами на магнитных оболочках, на которых с помощью радара наблюдались волны, являются преимущественно только протоны. Данные спутников подтверждают, что почти во всех изучаемых случаях колебания наблюдались на силовых линиях, находящихся за пределами плазмопаузы, поскольку концентрация частиц не превышала  $100 \text{ см}^{-3}$ . Только в случае 21 сентября 2014 г. она достигла  $1000 \text{ см}^{-3}$ ; однако в этот раз плазмопауза также находилась ближе к Земле, чем оболочки  $L = 3,9-4,1$ , на которых наблюдались колебания — резкий рост концентрации частиц соответствует оболочкам  $L < 3,5$  (рис. 5).

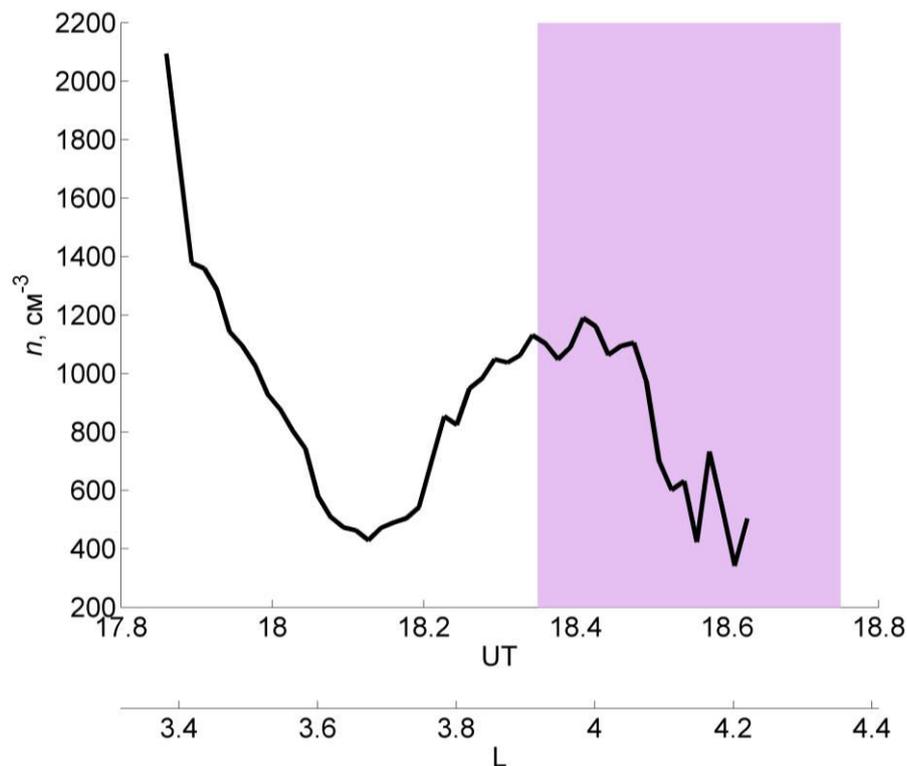


Рисунок 5. Зависимость концентрации частиц от номера магнитной оболочки по данным спутника RBSP-B. Вертикальная полоса обозначает диапазон магнитных оболочек, в пределах которых на радаре были зарегистрированы колебания.

В ряде случаев спутниками RBSP-A и RBSP-B были зарегистрированы колебания магнитного поля с частотами, близкими к частотам волн, наблюдавшихся на радаре. Как и в случае с радарными данными, к данным спутников применялся вейвлет-анализ.

Для анализа геомагнитной обстановки в дни регистрации колебаний использованы планетарные и авроральные индексы, значения которых размещены на сайте Центра анализа данных по геомагнетизму и космическому магнетизму университета Киото (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Данные о солнечном ветре и межпланетном магнитном поле были получены с помощью сервиса OMNIWeb Центра космических полётов Годдарда (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

### 2.3. Регистрация волн Екатеринбургским радаром

В качестве примера на рисунке 6 показаны скорости плазмы вдоль луча 0 и мощность сигнала на том же луче 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. При этом они не сопровождаются изменениями мощности принимаемого сигнала. На рисунке 7 показаны фильтрованные данные, полученные на лучах 0 и 1 для отдельного диапазона расстояний, на геомагнитной широте  $61^{\circ}$ . На рисунке 8 показан кросс-вейвлет спектр для этих рядов. На нем виден ряд колебательных гармоник: первая, наблюдавшаяся в течение получаса, имеет частоту около 3 мГц; вторая, с частотой 5,5 мГц, более слабая, наблюдалась одновременно с первой, но имела меньшую длительность; затем их сменили колебания с частотой на границе диапазонов Pc4 и Pc5, длившиеся около 10 минут, после чего частота колебаний снизилась до 5,3 мГц, и после этого колебания наблюдались еще примерно 15 минут. Азимутальные волновые числа в максимумах мощности колебаний были равны соответственно 4, -8 и -30. На рисунке 9 приведены корреляционные функции сигналов на соседних лучах для отдельных колебаний. Они построены по отфильтрованным данным для

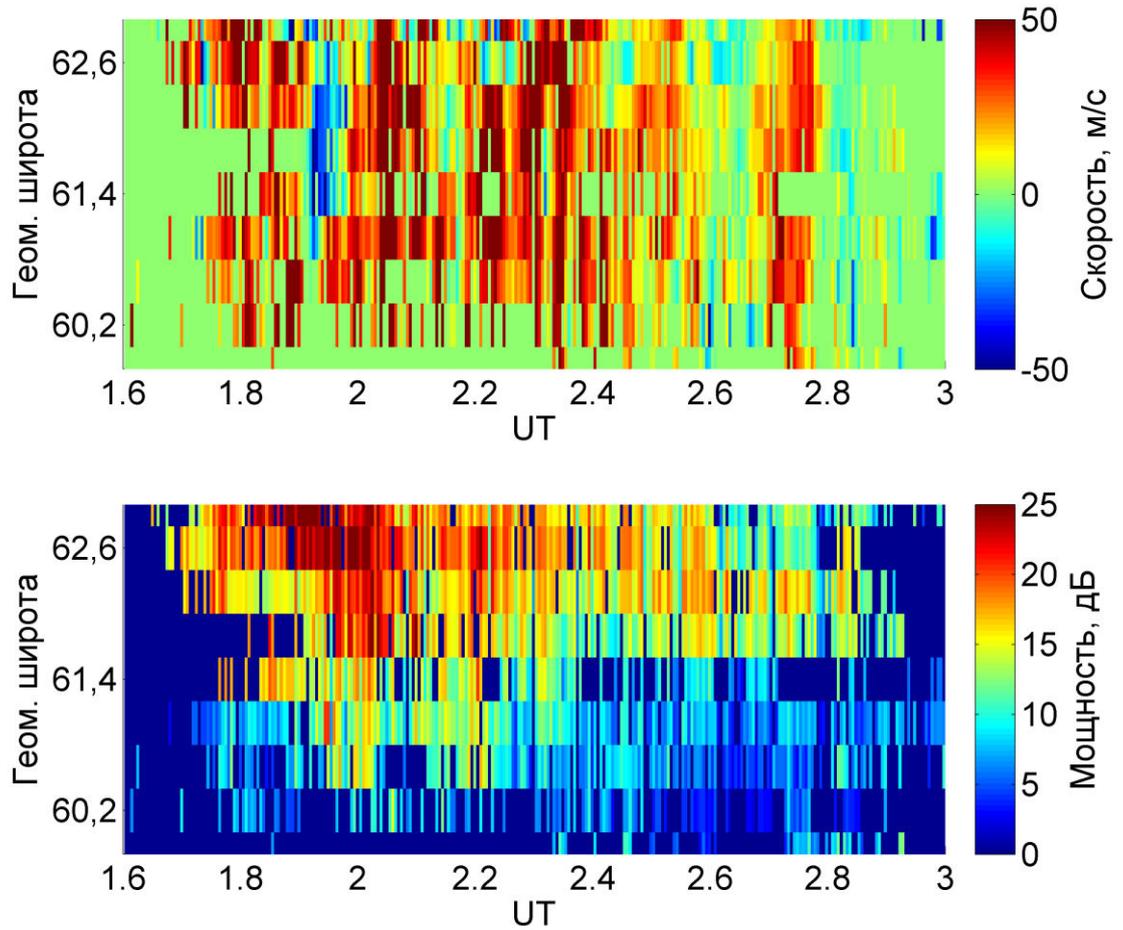


Рисунок 6. Скорости ионосферной плазмы вдоль луча 0 (вверху) и мощность рассеянного сигнала (внизу). 21 февраля 2014 г.

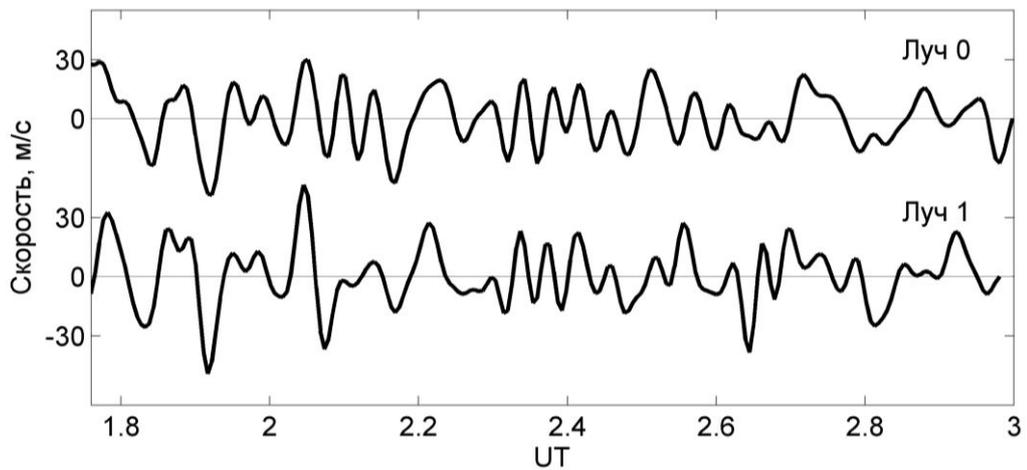


Рисунок 7. Колебания скорости плазмы вдоль лучей 0 и 1 в 45-километровом диапазоне расстояний от радара, примерно соответствующих геомагнитной широте  $61^{\circ}$ , 21 февраля 2014 г.

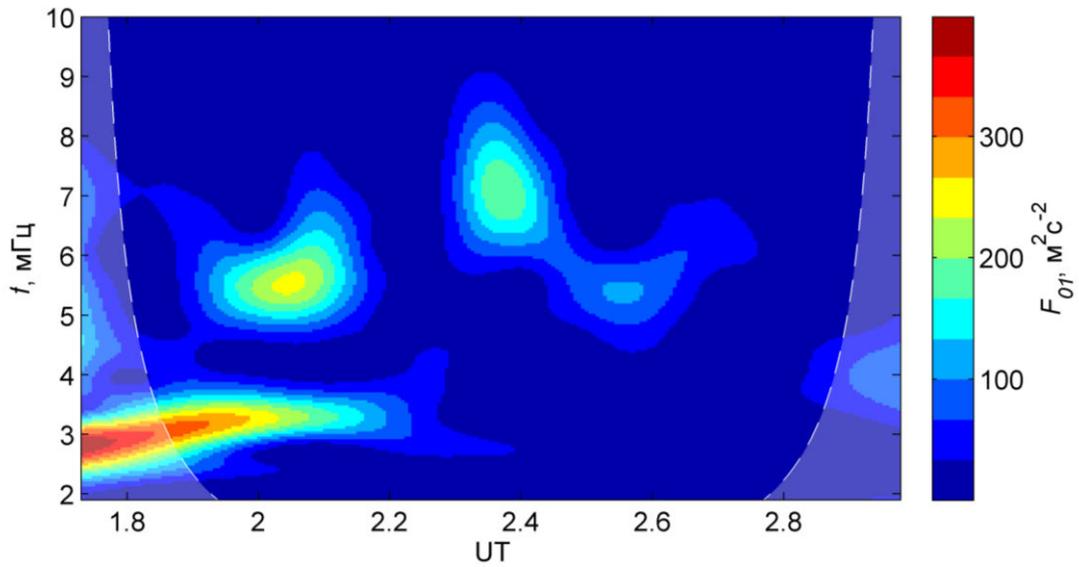


Рисунок 8. Кросс-вейвлет спектр для рядов данных, полученных вдоль лучей 0 и 1 на геомагнитной широте  $61^{\circ}$  21 февраля 2014 г.

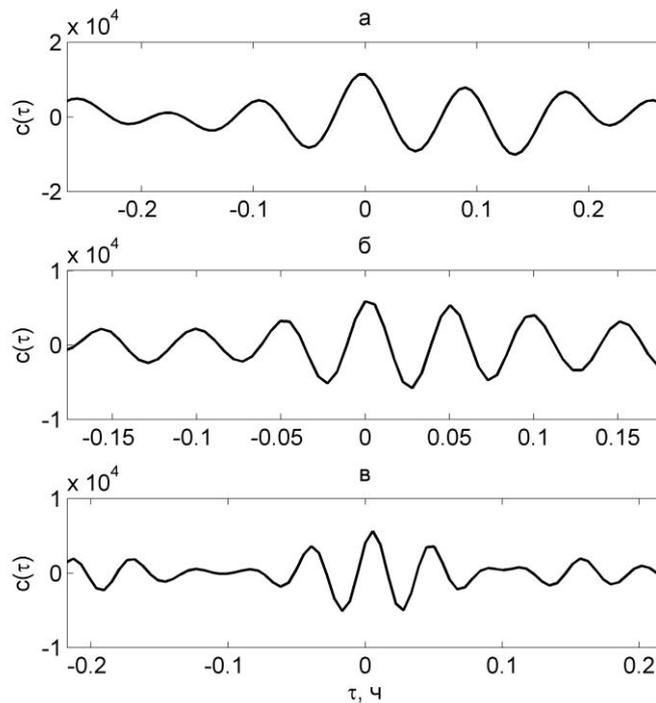


Рисунок 9. Корреляционная функция сигналов на лучах 0 и 1 на геомагнитной широте  $61^{\circ}$  21 февраля 2014 г. (а) отфильтрованных в диапазоне 1,6–4,5 МГц, для периода 0145–0225 UT; (б) в диапазоне 4–8 МГц, 0145–0215 UT; (в) в диапазоне 4–10 МГц, 0215–0250 UT.

соответствующих интервалов времени. Максимум огибающей колебаний функции находится в области отрицательных  $t$  для первой волны и в области положительных  $t$  для двух других волн. Как и знаки азимутального волнового числа, это означает направление распространения волны на восток в первом случае и на запад во втором и третьем случаях.

### **Глава 3. Характеристики магнитосферных волн, зарегистрированных с помощью Екатеринбургского радара**

В главе приведены результаты, полученные с использованием данных, собранных вдоль лучей 0–2 радара в режиме высокого временного разрешения с сентября 2014 г. по март 2015 г. включительно. В ходе эксперимента было зарегистрировано 39 случаев наблюдения УНЧ-волн. Длительность большинства событий составляла менее одного часа, зачастую колебания наблюдались около 20 минут. Особенности расположения радара определяют сезонное и суточное распределение зарегистрированных колебаний: за три месяца с мая по июль 2014 г., когда высокоширотная ионосфера освещена солнцем большую часть суток, был зарегистрирован только один случай наблюдения волн; в зимние месяцы, с ноября 2014 г. по январь 2015 г. зарегистрировано 15 случаев, что составляет почти 40% всех случаев. Колебания наблюдались в ночной ионосфере, в период 1900–0330 UT (всемирного времени), кроме одного, которое продолжалось до 0430 UT. Этот временной интервал примерно соответствует 2230–0700 MLT. В дневное время в значительной части поля обзора радара наблюдается сигнал, рассеянный на земной поверхности, поэтому наблюдения сигнала, рассеянного на ионосферных неоднородностях, затруднены. Сигнал обратного рассеяния, содержащий информацию о колебаниях, принимался из диапазона 57–68<sup>0</sup> магнитной широты. Этот интервал соответствует магнитным оболочкам с номерами 3,4–6,7 (рассчитано по модели IGRF, International Geomagnetic Reference Field, [Thébault et al., 2015]).

Проведен статистический анализ наблюдаемых с помощью радара волн, в результате которого показано, что существенная их часть имеет частоты ниже частот альфвеновских стоячих волн. Для отдельных случаев наблюдения выявлены особенности, характерные для компрессионных буревых пульсаций и, в частности, дрейфово-компрессионной моды.

### **3.1. Сравнение частот наблюдаемых волн с частотами собственных колебаний силовых линий**

Одной из задач данной работы является решение вопроса об идентификации мод всего набора колебаний, наблюдаемых с помощью радара. Одним из распространенных подходов к этой проблеме является отнесение всех наблюдающихся с помощью радаров волн диапазона Pc5 к альфвеновской моде [напр., James et al., 2013; James et al., 2016]. Однако, как будет показано ниже, такой подход является не вполне корректным.

Некоторую ясность в вопрос идентификации мод колебаний вносит сравнение частот волн, регистрируемых с помощью радара, с частотой базовой гармоники стоячих альфвеновских колебаний силовых линий. Для этого используются данные спутников, траектория которых пересекает соответствующие магнитные оболочки в долготном секторе радарных наблюдений (см. раздел 2.2). Совпадение частот не является достаточным критерием для отнесения колебания к альфвеновской моде, однако при этом их расхождение на существенную величину указывает на невозможность принадлежности волны к ней. В случае регистрации с помощью радара альфвеновских волн небольшая разница в величине наблюдаемой и смоделированной частот может быть обусловлена неточностью использующихся моделей, а также недостаточно близким к сектору радарных наблюдений положением спутника. Подобным образом, в случае наблюдения высших гармоник альфвеновского резонанса, их частота должна быть в

кратное число раз выше альфвеновской частоты, рассчитанной на основе спутниковых данных.

Для сравнения наблюдаемых с помощью радара и рассчитанных по спутниковым данным частот выбрано 16 случаев, в которых, благодаря подходящему расположению спутника, доступны данные измерений параметров плазмы и магнитного поля в магнитосфере. В таблице 1 приведен список отобранных случаев, времена наблюдений колебаний на радаре, номера магнитных оболочек, на которых наблюдались максимальные амплитуды, а также с информация о спутниках, времена их проходов через сектор наблюдений. На рисунках 10(а) и 10(б) показаны скорости плазмы для этих случаев, измеренные радаром.

Выбранные события условно можно разделить на две группы, основываясь на геомагнитной обстановке во время наблюдений. К первой, большей группе относятся случаи регистрации радаром колебаний в условиях слабо возмущенной магнитосферы. Значения планетарного индекса  $K_p$  находились в пределах от 2+ до 3+. Плотность солнечного ветра не превышала в среднем  $5 \text{ см}^{-3}$ . Все эти колебания были зарегистрированы в периоды, когда межпланетное магнитное поле было направлено на юг. Значения аврорального индекса  $A_E$  изменялись в пределах 200–600 нТл.

Ко второй группе относятся случаи, зарегистрированные в условиях умеренно возмущенного геомагнитного поля. Это события 15 и 19 октября, 7, 24 и 26 декабря 2014 г. Значения планетарного индекса  $K_p$  достигали 4+. Плотность солнечного ветра была выше, чем во время ранее описанных событий, и достигала  $18 \text{ см}^{-3}$ . Значения индекса  $A_E$  были в пределах 600–800 нТл. Авроральные индексы и данные наземных магнитометров указывали на значительный рост авроральной активности в эти дни. Возмущения могли быть вызваны изменениями направления ММП на юг и его длительными, в течение нескольких часов, периодами сохранения этого направления. Это, как правило, приводило к постепенному росту кольцевого тока с уменьшением индекса  $SYM-H$  до  $-35 \dots -50$  нТл. Девятнадцатого октября 2014 г. колебания величины магнитного поля начались, когда значения  $SYM-H$  достигли

минимума, на фоне резкого увеличения плотности солнечного ветра до  $11 \text{ см}^{-3}$ , при северном направлении ММП.

Таблица 1 — Параметры зарегистрированных радаром ЕКВ колебаний и информация о соответствующих спутниках

Дата	Радар ЕКВ			Название	Спутник	
	UT	L, R <sub>E</sub>	MLT		UT	MLT
04.09.2014	2230–2300	4,9	2,0–2,5	RBSP-A	2320–2400	3,8–4,2
21.09.2014	2000–2100	4,1	23,5–1,5	RBSP-B	1815–1840	2,0–2,5
29.09.2014	2230–2300	4,5	2,0–2,5	RBSP-A	0020–0030	2,3–2,5
15.10.2014	2400–0200	4,4	3,5–5,5	RBSP-B	0155–0300	1,1–2,2
19.10.2014	0200–0300	4,7	5,5–6,5	RBSP-B	0020–0135	4,4–5,6
09.11.2014	1930–2030	4,6	23,0–24,0	THE	2210–2235	1,6–2,1
22.11.2014	2230–2330	4,7	2,0–3,0	THD	2235–2345	0,2–1,4
02.12.2014	2230–2330	4,3	2,0–3,0	THD	2245–2310	0,3–1,0
07.12.2014	2330–0400	4,2	3,0–7,5	RBSP-B	0230–0240	4,3–4,6
09.12.2014	2030–2330	4,9	24,0–3,0	RBSP-B	1835–1850	23,6–24,0
24.12.2014	0100–0400	4,0	4,5–7,5	RBSP-A	0325–0340	3,8–4,3
24.12.2014	2030–2400	4,8	24,0–3,5	RBSP-B	1930–2040	23,0–0,1
25.12.2014	2400–0100	4,5	3,5–4,5	RBSP-B	0045–0100	3,8–4,2
26.12.2014	2300–2400	4,0	2,5–3,5	RBSP-B	1930–2200	1,5–3,9
03.01.2015	0300–0600	4,2	6,5–9,5	RBSP-A	0535–0555	3,3–3,7
14.03.2015	2000–2300	5,8	23,5–2,5	RBSP-A	2030–2125	23,1–23,9

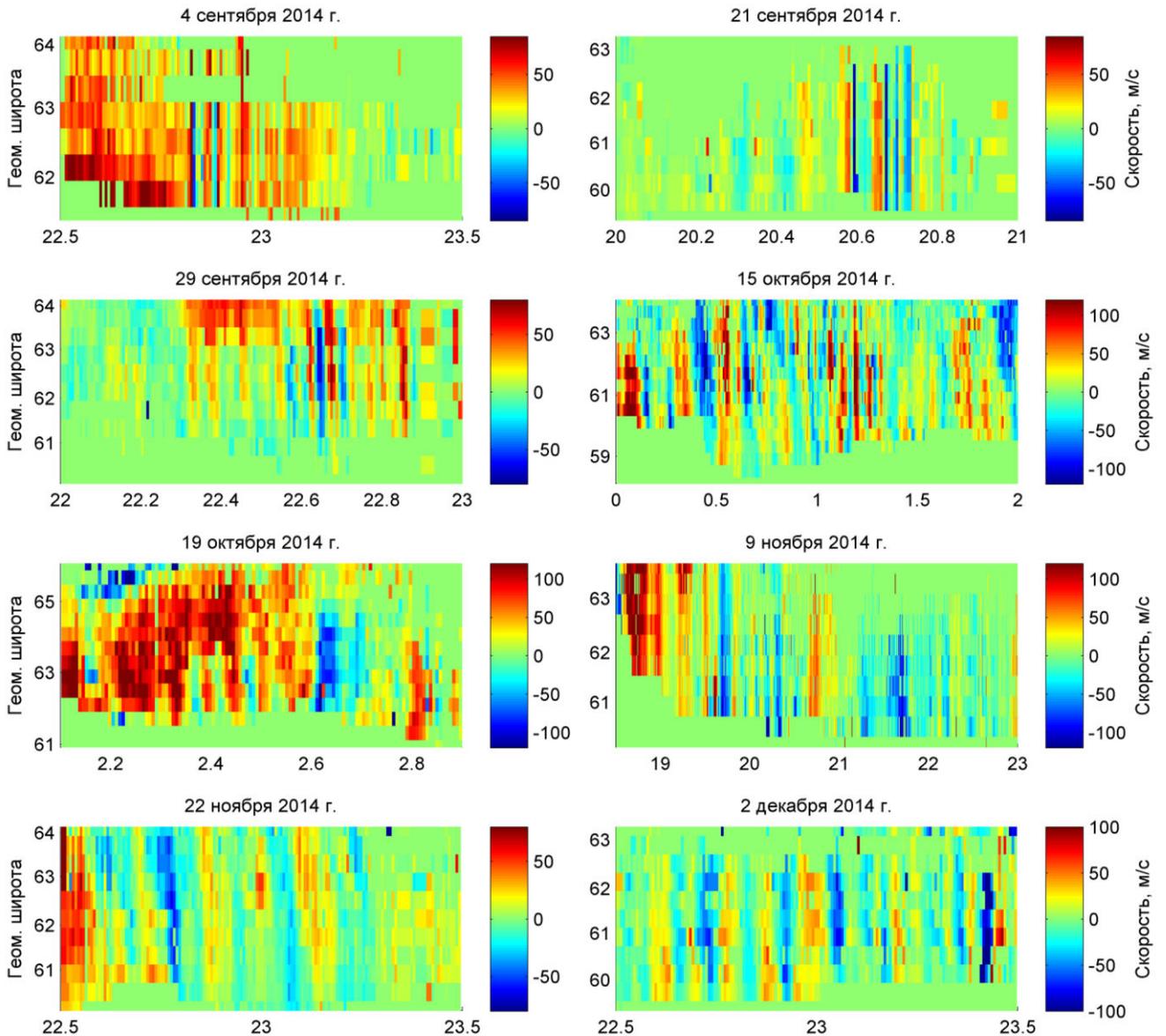


Рисунок 10 (а). Скорости плазмы вдоль луча 0 для отобранных для анализа случаев.

В рамках отобранных для анализа 16 событий наблюдалось 33 колебательных гармоник, определенных в соответствии с методом, описанным в разделе 2.1. Их частоты находятся в пределах 2–6 мГц. На рисунке 11 показано распределение колебаний по частотам и азимутальным волновым числам. Все значения  $m$  кроме одного находятся в пределах от  $-90$  до  $40$ . Медианное значение распределения равно  $-28$ , и менее одной пятой части всех колебаний

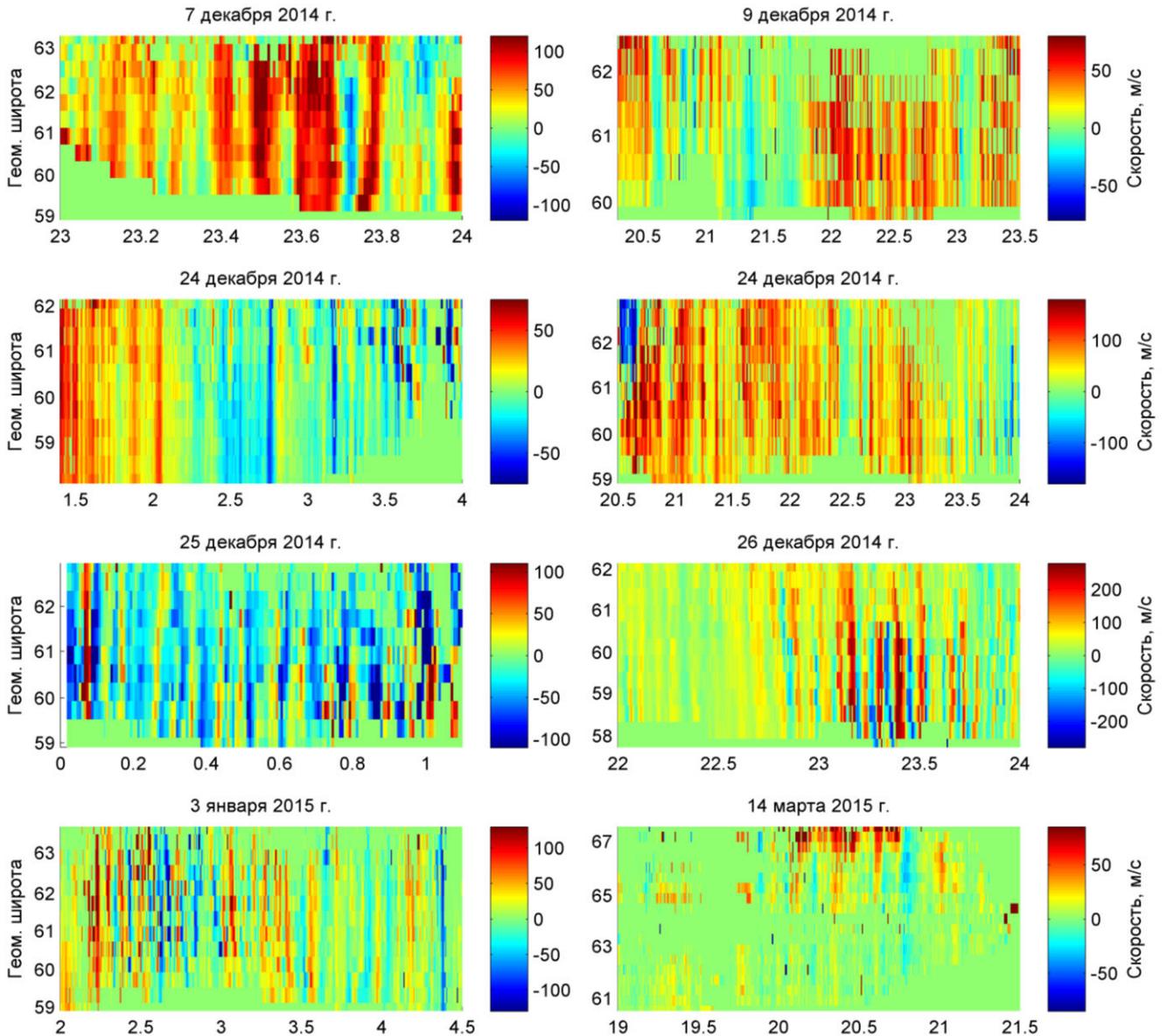


Рисунок 10 (б). Скорости плазмы вдоль луча 0 для отобранных для анализа случаев.

имеют положительные  $m$ . Это означает, что волны, регистрируемые радаром, преимущественно распространяются на запад.

Колебания наблюдались при различных геомагнитных условиях и на разных магнитных оболочках. В каждом случае наблюдений параметры магнитного поля и плазмы в магнитосфере, а, следовательно, и условия генерации и распространения волн были разные.

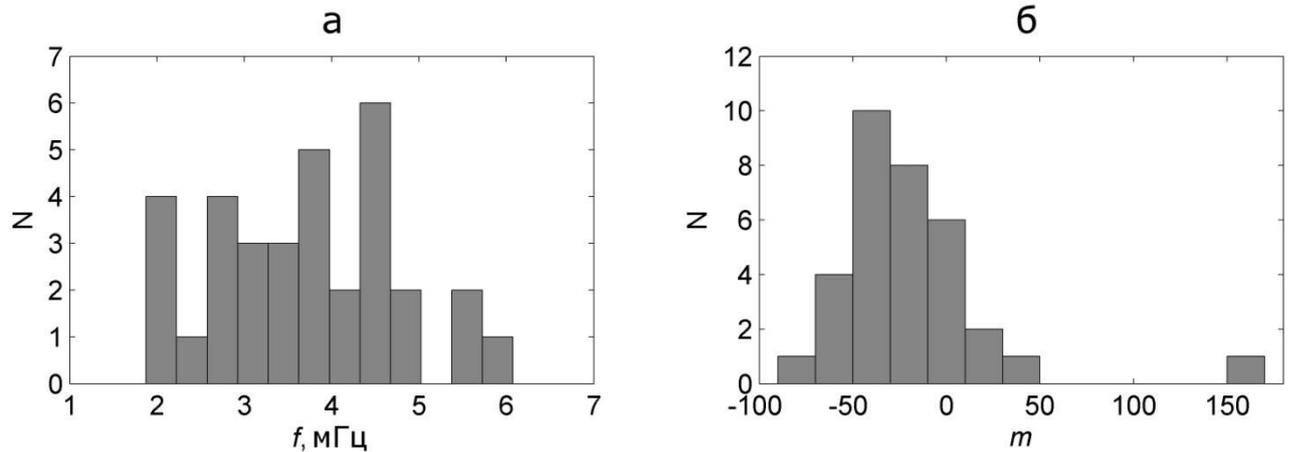


Рисунок 11. Распределение анализируемых событий по частотам (а) и азимутальным волновым числам (б).

Для проведения сравнительного анализа свойств колебаний, их частоты сопоставлялись с частотами собственных колебаний силовых линий. Такой анализ позволяет сделать вывод о природе волн, наблюдаемых с помощью радара. Чтобы получить значения альфвеновской частоты для каждого случая на заданной магнитной оболочке, данные спутников использовались методом, описанным в разделе 2.2. Для каждого случая было получено свое значение частоты собственных колебаний, и каждой колебательной гармонике ставилось в соответствие отношение ее частоты к альфвеновской частоте  $f/f_A$ . Распределение всех волн по величине этого отношения показано на рисунке 12 (а). 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. Однако следует принимать во внимание неточность моделей, использующихся для оценки альфвеновской частоты, а также некоторую разницу во времени наблюдения колебаний радаром со временем прохождения спутников через соответствующие магнитные оболочки и разнесенность спутников и радара по долготе. Эти факторы могут влиять на расхождение частоты 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 еще 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.

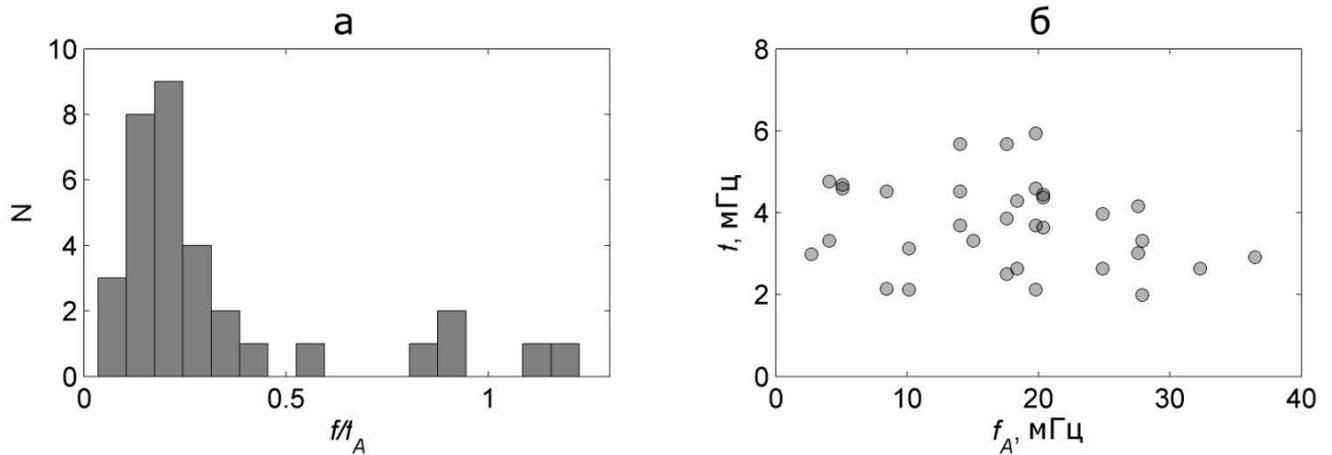


Рисунок 12. Распределение частот колебательных гармоник по отношению  $f/f_A$  для 16 случаев наблюдений (а); зависимость  $f(f_A)$  для этих же случаев.

На рисунке 12(б) показана зависимость частоты наблюдаемых с помощью радара 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.

### 3.2. Идентификация мод наблюдаемых радаром колебаний

Отсутствие признаков наблюдения волн в магнитосфере в большей части случаев может быть объяснено разностью во времени между наблюдением волн на радаре и проходом спутника через область наблюдения, а также несовпадением долготы наблюдательных инструментов. Стоит отметить, что в

случаях наблюдения волн на спутниках колебания были компрессионными, то есть колебания магнитного поля происходили в противофазе с колебаниями давления плазмы.

Поскольку во время всех случаев регистрации колебаний наблюдалась авроральная активность, которая обычно сопровождается инжекцией частиц в магнитосферу, а колебания, которые были зарегистрированы спутниками, являются компрессионными, их можно отнести к буревым компрессионным Pc5-пульсациям [Anderson et al., 1993].

Природа буревых компрессионных волн диапазона Pc5, имеющих обычно большие значения  $m$  и частоты ниже частоты стоячей альфвеновской волны, часто бывает не вполне ясна. Руководствуясь теорией МГД, следует относить их 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]. Кроме того, частота ММЗ слишком мала для приведенных случаев, она на два порядка ниже альфвеновской частоты [Leonovich, Kozlov, 2013]. Еще одним аргументом является то, что ММЗ имеет частоту, всецело определяемую номером магнитной оболочки, то есть на одной оболочке может существовать волна только с одной определенной частотой [Leonovich, Kozlov, 2013]; при этом 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.

Частота альфвеновских колебаний может оказаться меньше приведенных выше оценочных значений, если учитывать давление плазмы, а также кривизну силовых линий. В этом случае локальное дисперсионное соотношение для полоидальной альфвеновской волны имеет вид [Klimushkin, Mager, 2015]

$$\omega_A^2 = [k_{\parallel}^2 + \eta]A^2(L), \quad (3.1)$$

где  $k_{\parallel}$  — продольная составляющая волнового вектора, а  $\eta$  — слагаемое, обусловленное давлением плазмы:

$$\eta = 2\kappa_c \left( \frac{4\pi P'}{B^2} + \kappa_c \beta \right), \quad (3.2)$$

где  $\kappa_c$  — кривизна силовых линий,  $P'$  — производная давления плазмы по радиальной координате, а  $\beta$  — отношение плазменного давления к магнитному. Моду, описанную соотношением (3.1), называют баллонной, и ее частота в случае больших отрицательных градиентов давления может быть ниже, чем в холодной плазме. Однако в случае баллонной моды, как и для ММЗ, на одной магнитной оболочке не могут существовать две волны с разными частотами.

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 мала, она 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, нетипичные 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 оболочке [Mager et al., 2013]:

$$\Omega_M = \frac{m}{L} \frac{\frac{2}{3} \frac{L_b}{\beta_{eq}} \Lambda_N V_d + V_n^* + V_T^*}{1 - \frac{V_T^*}{V_d}}, \quad (3.3)$$

где  $L_b$  — длина пути частицы вдоль силовой линии,  $\Lambda_N$  — собственное значение уравнения дрейфово-компрессионной моды, которое зависит от длины волны как  $\Lambda_N \sim 1/\lambda$ ,  $\beta_{eq}$  — отношение давления плазмы к магнитному давлению на магнитном экваторе,  $V_d$  — скорость дрейфа частиц в неоднородном магнитном поле,  $V_n^*$  и  $V_T^*$  — дрейфовые скорости поперек магнитного поля, обусловленные градиентами плотности и температуры соответственно. Соотношение (3.3) имеет ограничения по величине  $m$ . Гирокинетическая теория, которая используется для его вывода, неприменима к большой длине волны в поперечном направлении, то есть для малых  $m$ ; кроме того, при очень больших  $m$  линейная зависимость нарушается из-за сцепления дрейфово-компрессионной моды с альфвеновской [Mager et al., 2015].

В большинстве показанных случаев волны имеют отрицательные азимутальные волновые числа, то есть распространялись на запад, в направлении дрейфа положительных ионов. Эти результаты сходятся 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 нескольких рассмотренных здесь случаях волны имеют положительные азимутальные волновые числа. Направление их фазовой скорости совпадает с направлением дрейфа электронов. Теоретическая возможность возбуждения дрейфово-компрессионных волн благодаря резонансу с энергичными электронами показана в [Костарев, Магер, 2017].

Таким образом, результаты анализа, показывающие низкие по сравнению с альфвеновской значения частот значительной части наблюдаемых

колебаний, приводят к выводу о том, что наиболее вероятным объяснением природы этих волн является дрейфово-компрессионная мода.

### 3.3. Особенности структуры колебаний 26 декабря 2014 г.

Отдельный интерес представляет случай наблюдения волн 26 декабря 2014 г. Колебания были зарегистрированы в послеполуночном секторе, в период 2230–2400 UT, при этом максимальные амплитуды колебаний, более 200 м/с наблюдались около 2300–2330 UT на геомагнитных широтах 58–60° (рис. 13). Фаза волны не менялась с ростом магнитной широты, что указывает на азимутальное распространение и отсутствие зависимости частоты от номера магнитной оболочки (рис. 14). Из кросс-вейвлет спектра для рядов данных, полученных на лучах 0 и 1 (рис. 15), видно, что частота квазимонохроматической волны в течение 20 минут постепенно снижалась с 4,3 до 2,9 мГц, а затем увеличилась до 3.1 мГц в течение следующих 5–6 минут. Схожая частотно-временная зависимость наблюдается в рядах данных из соседних диапазонов дальностей, а также в кросспектрах пары лучей 1 и 2.

Данные колебания наблюдались с помощью радара ЕКБ на фоне умеренно возмущенного геомагнитного поля (рис. 16). Скорость солнечного ветра менялась в пределах 400–550 км/с, а его плотность не превышала 8 см<sup>-1</sup>. Индекс Кр достигал значения 4+, SYM-H уменьшился до –45 нТл. Двухчасовой период направленного на юг межпланетного магнитного поля, начавшийся с 1820 UT привел к росту авроральной активности — значение индекса АЕ превысило 500 нТл.

На рисунке 17 показаны значения частоты и азимутального волнового числа  $m$  в максимумах кросс-вейвлет спектров, построенных по данным, относящимся к четырем диапазонам дальности в интервале геомагнитных широт 58,5–59,7°. Используются данные именно из этого интервала, поскольку они являются наиболее полными и соответствуют широтному максимуму амплитуды колебаний. На панелях *в* и *г* показаны медианные значения для

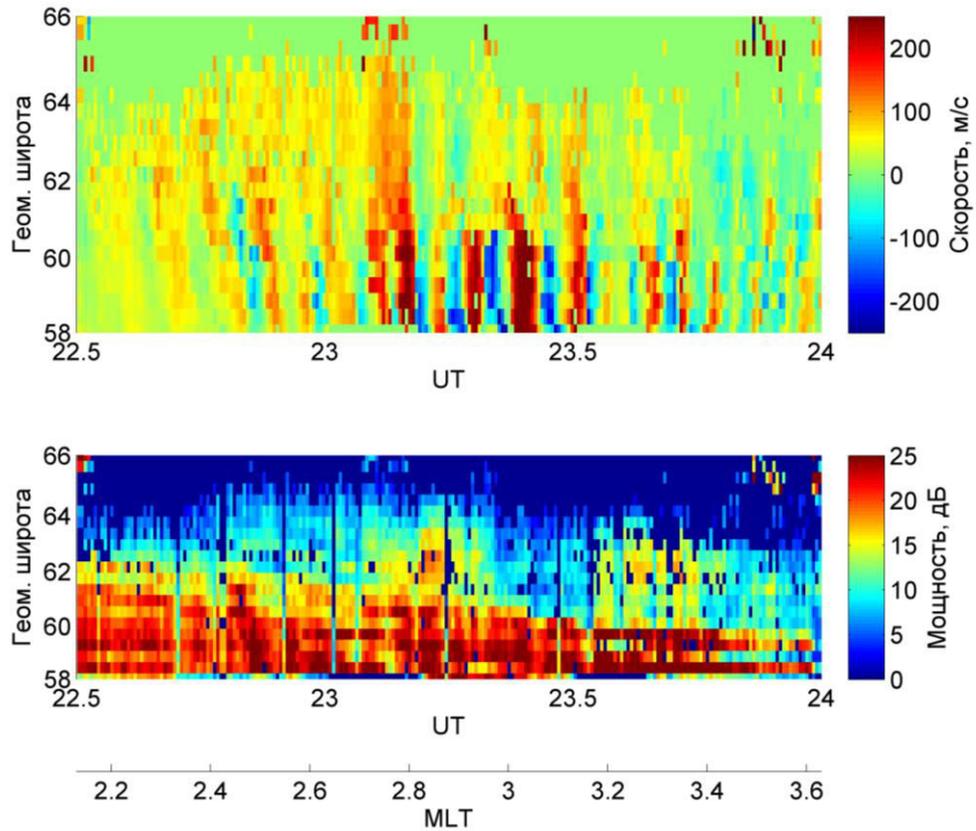


Рисунок 13. Скорости плазмы вдоль луча 0 (вверху) и мощность сигнала на том же луче (внизу) 26 декабря 2014 г.

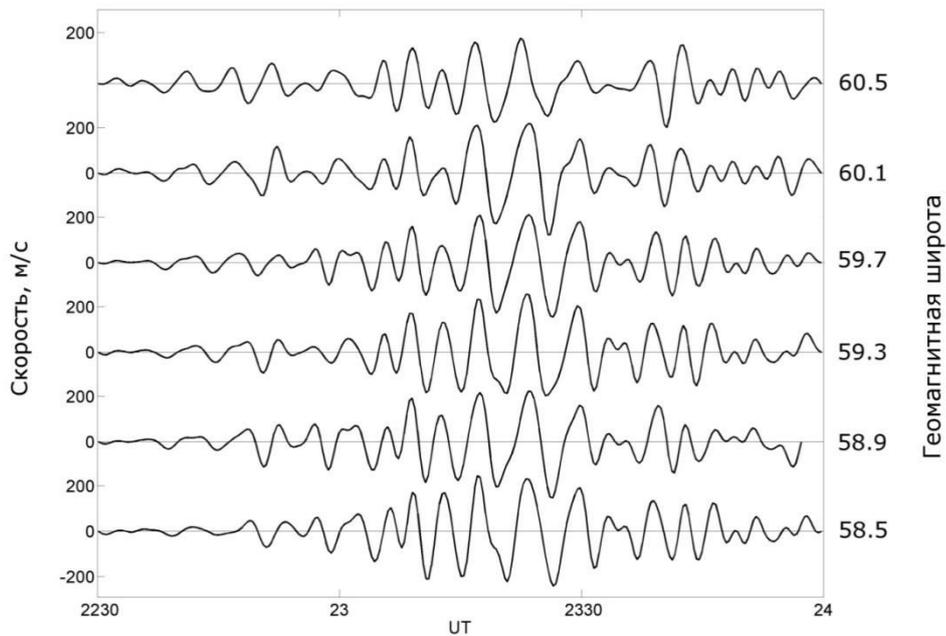


Рисунок 14. Колебания скорости плазмы вдоль луча 0 на разных геомагнитных широтах 26 декабря 2014 г.

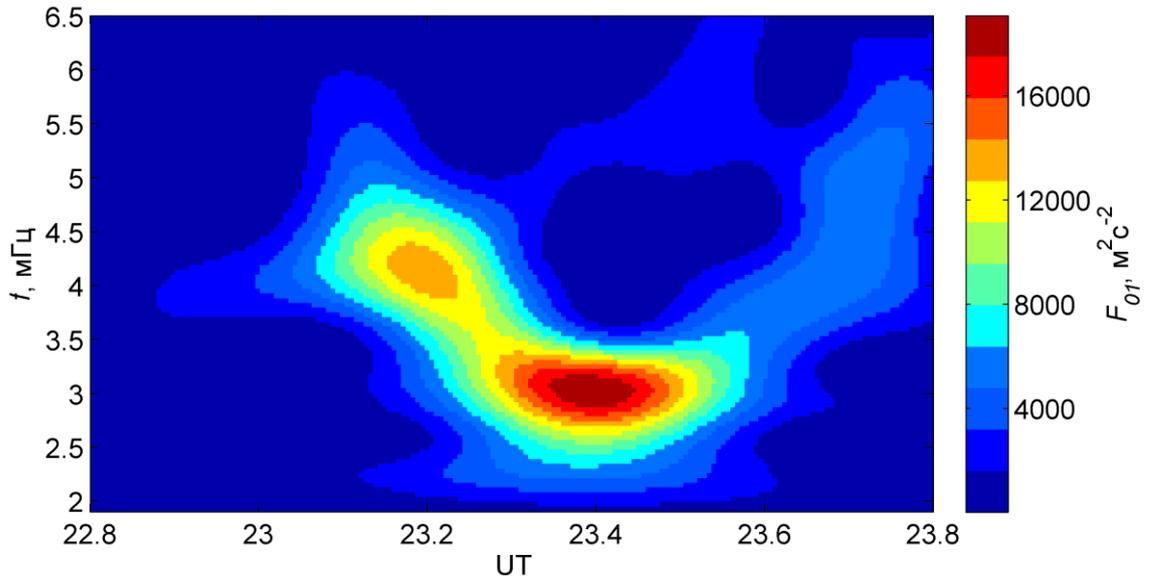


Рисунок 15. Кросс-вейвлет спектр для рядов данных, полученных вдоль лучей 0 и 1 на геомагнитной широте  $59,3^{\circ}$ .

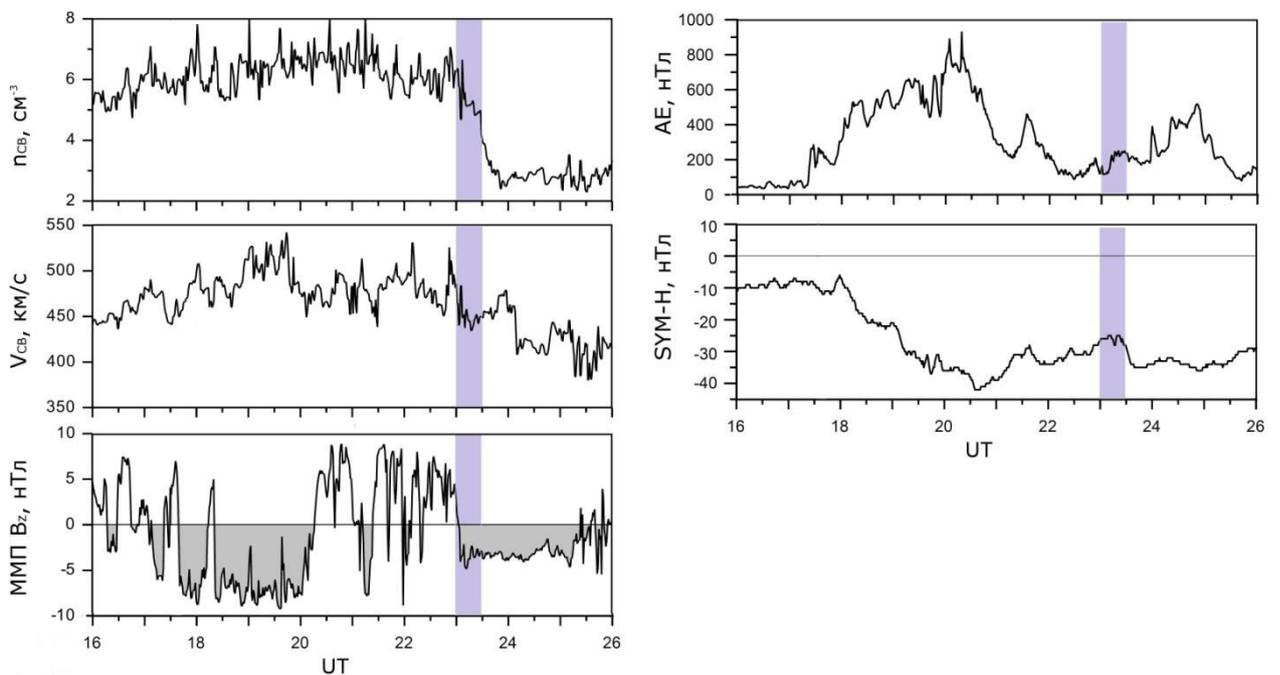


Рисунок 16. Слева: плотность и скорость солнечного ветра, вертикальная компонента ММП по данным спутника ACE. Справа: значения индексов AE и SYM-H 26 декабря 2014 г. Вертикальная полоса обозначает период времени, в течение которого наблюдались колебания скорости ионосферной плазмы.

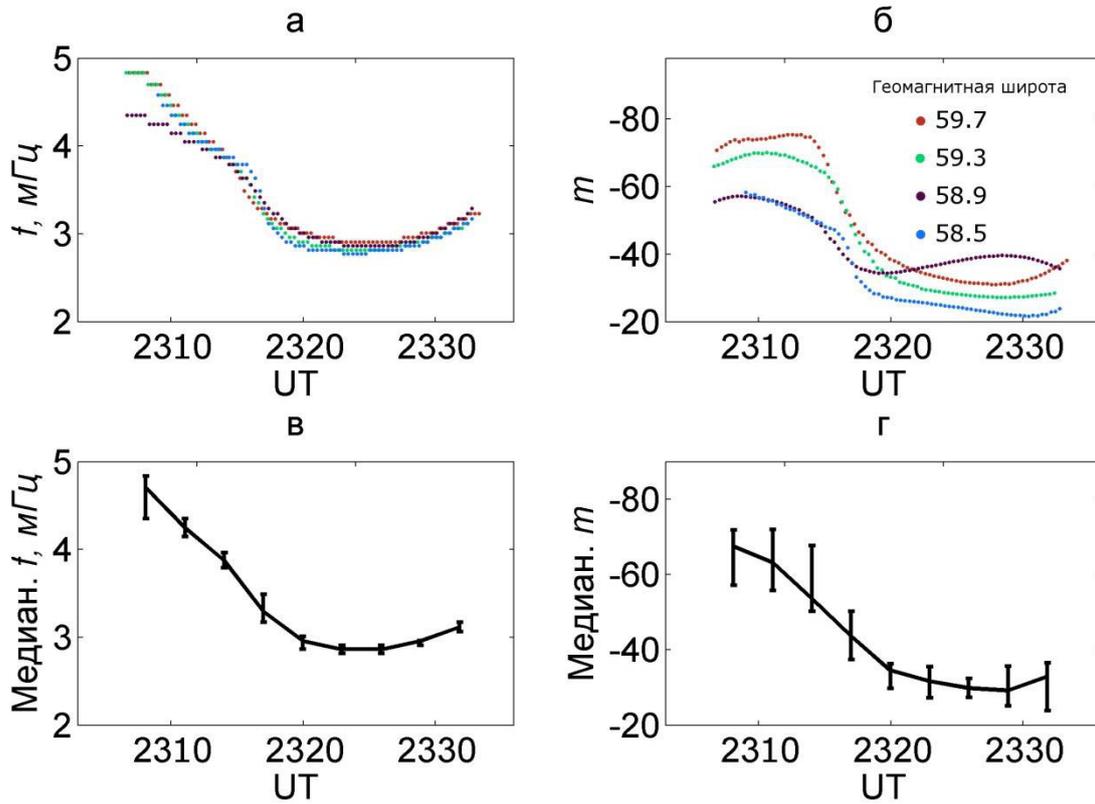


Рисунок 17. Значения частоты (а) и азимутального волнового числа  $m$  (б), соответствующие максимумам кросс-вейвлет спектров на разных геомагнитных широтах и их медианные значения (в, г). Планки погрешностей обозначают нижние и верхние квартили.

этих параметров по всем четырем диапазонам расстояний. 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 рисунке 18 показана зависимость частоты от волнового числа  $m$  в заданном периоде времени и диапазоне широт.

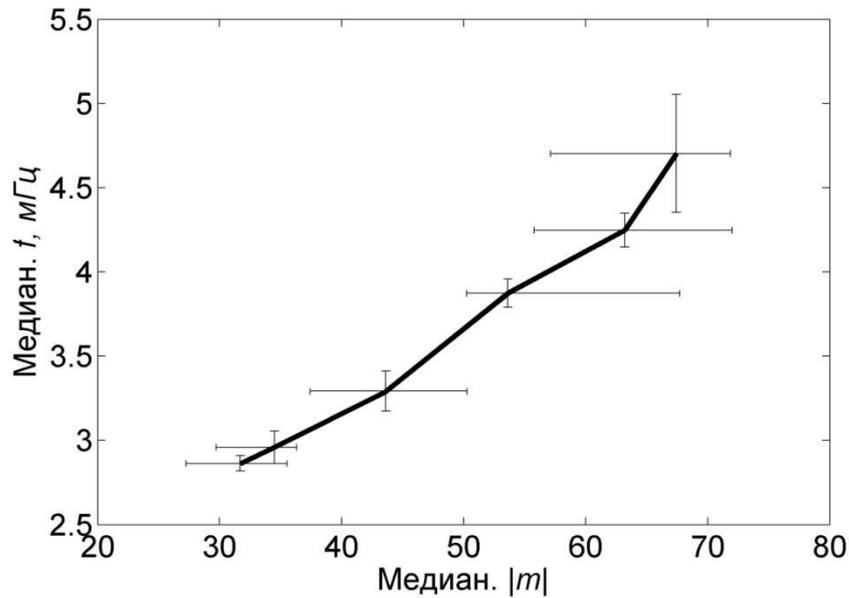


Рисунок 18. Зависимость медианных значений частоты и азимутального числа  $m$ . Планки погрешностей обозначают нижние и верхние квантили.

Как и в остальных случаях наблюдения волн, описанных в разделе 3.1, была проведена оценка соответствующей частоты стоячей альфвеновской волны. Использовались данные спутника RBSP-B, который примерно за час до регистрации колебаний на радаре находился в секторе 2,5–3,8 MLT, перемещаясь от оболочки  $5,6 R_E$  к  $4,2 R_E$ , что соответствует геомагнитным координатам  $58,9–55,0^\circ$ . На рисунке 19 показана альфвеновская частота как функция номера магнитной оболочки для четырех разных значений  $\alpha$ . В диапазоне магнитных оболочек, на которых с помощью радара наблюдались колебания (диапазон обозначен фиолетовой полосой), частота альфвеновской стоячей волны находится в пределах 13–23 мГц, то есть в 3–8 раз выше частоты колебаний ионосферной плазмы.

Следует отметить, что для альфвеновской моды, сгенерированной при резонансном взаимодействии волн и частиц также существует зависимость частоты от азимутального волнового числа:  $\omega = m\bar{\omega}_d$ , где  $\bar{\omega}_d$  — усредненная по баунс-траектории дрейфовая частота [Southwood, 1980]. Однако приведенное

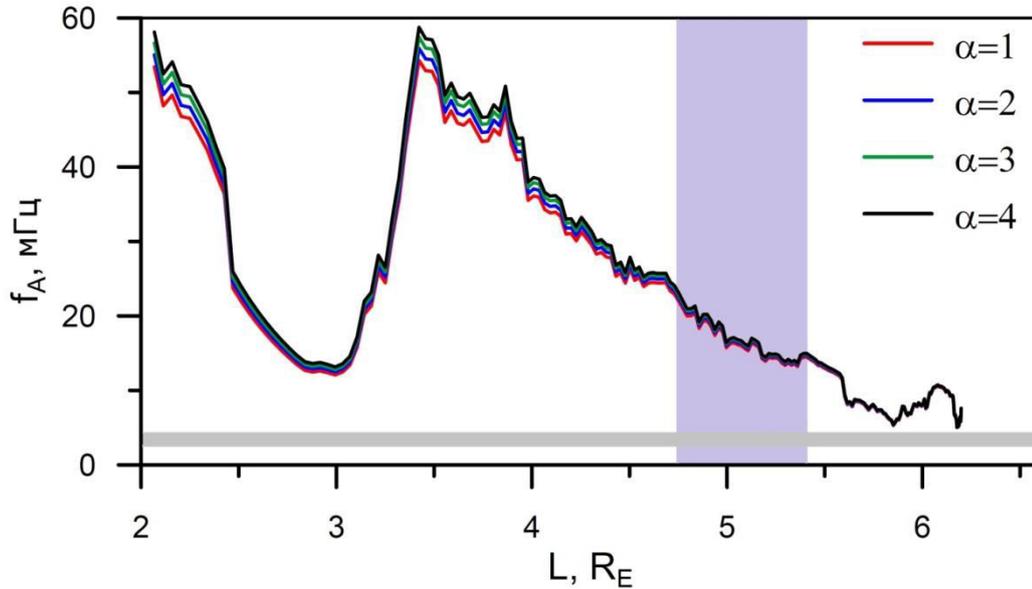


Рисунок 19. Зависимость частоты главной альфвеновской моды от номера магнитной оболочки по данным спутника RBSP-B. Горизонтальная серая полоса обозначает диапазон частот колебаний, зарегистрированных радаром. Вертикальная полоса обозначает диапазон магнитных оболочек, в пределах которых они наблюдались.

соотношение означает, что магнитная оболочка, на которой может существовать альфвеновская мода с заданной частотой, определяется азимутальным волновым числом [Магер, Климушкин, 2007]. Таким образом, допустимая частота альфвеновских колебаний меняется с изменением  $m$ , которое, в свою очередь, меняется с изменением магнитной оболочки, и приведенное соотношение не действительно на заданной фиксированной оболочке. Действительно, частота альфвеновской моды  $\Omega_A$ , согласно дисперсионному соотношению, меняется только с изменением магнитной оболочки:  $\omega_A^2 = k_{\parallel}^2 A^2(L)$ . Подобные соображения действуют и для альфвеновских мод, излучаемых током, создаваемым дрейфующими частицами [Mager et al., 2009; Zolotukhina et al., 2008], а также распространяются на баллонную моду.

Как видно из соотношения (3.3), зависимость частоты от азимутального волнового числа на фиксированной магнитной оболочке свойственна для

дрейфово-компрессионной моды. Также линейная зависимость  $f(m)$  характерна и для дрейфово-зеркальной моды, но, как обсуждалось в разделе 3.2, условия генерации дрейфово-зеркальной моды не типичны для магнитосферы.

Таким образом, основными выводами анализа колебаний, наблюдавшихся 26.12.2014, помимо высоких значений  $m$  и распространения волны на запад, являются: (1) выраженная зависимость частоты от величины азимутального волнового числа; (2) частота колебаний в несколько раз ниже собственной частоты альфвеновских колебаний силовых линий. Эти особенности позволяют однозначно идентифицировать волну как дрейфово-компрессионную моду.

#### **3.4 Одновременные наблюдения колебаний на спутнике и радаре 25 декабря 2014 г.**

В разделе рассмотрен случай наблюдений 25 декабря 2014 г., в котором одновременно с радаром волна была зарегистрирована в данных спутника.

На рисунке 20 показаны скорости ионосферной плазмы, зарегистрированные в этот день радаром вдоль луча 0 в послеполуночном секторе. Амплитуда колебаний скорости достигала 80 м/с, что примерно соответствует колебаниям электрического поля с амплитудами около 4 мВ/м. Максимальная амплитуда наблюдалась на удалении 540–1000 км от радара вдоль этого луча, что соответствует магнитным оболочкам с номерами 3,7–4,9. Частота колебаний была примерно равна 4 мГц. Волна распространялась на запад, значение азимутального волнового числа  $m$ , полученное из сравнения колебаний вдоль лучей 0 и 1, было около  $-40$ . Соответствующих колебаний мощности рассеянного сигнала обнаружено не было.

Геомагнитное поле в день наблюдений было слабо возмущено, с максимальным уровнем индекса  $K_p$  3+. Плотность солнечного ветра была

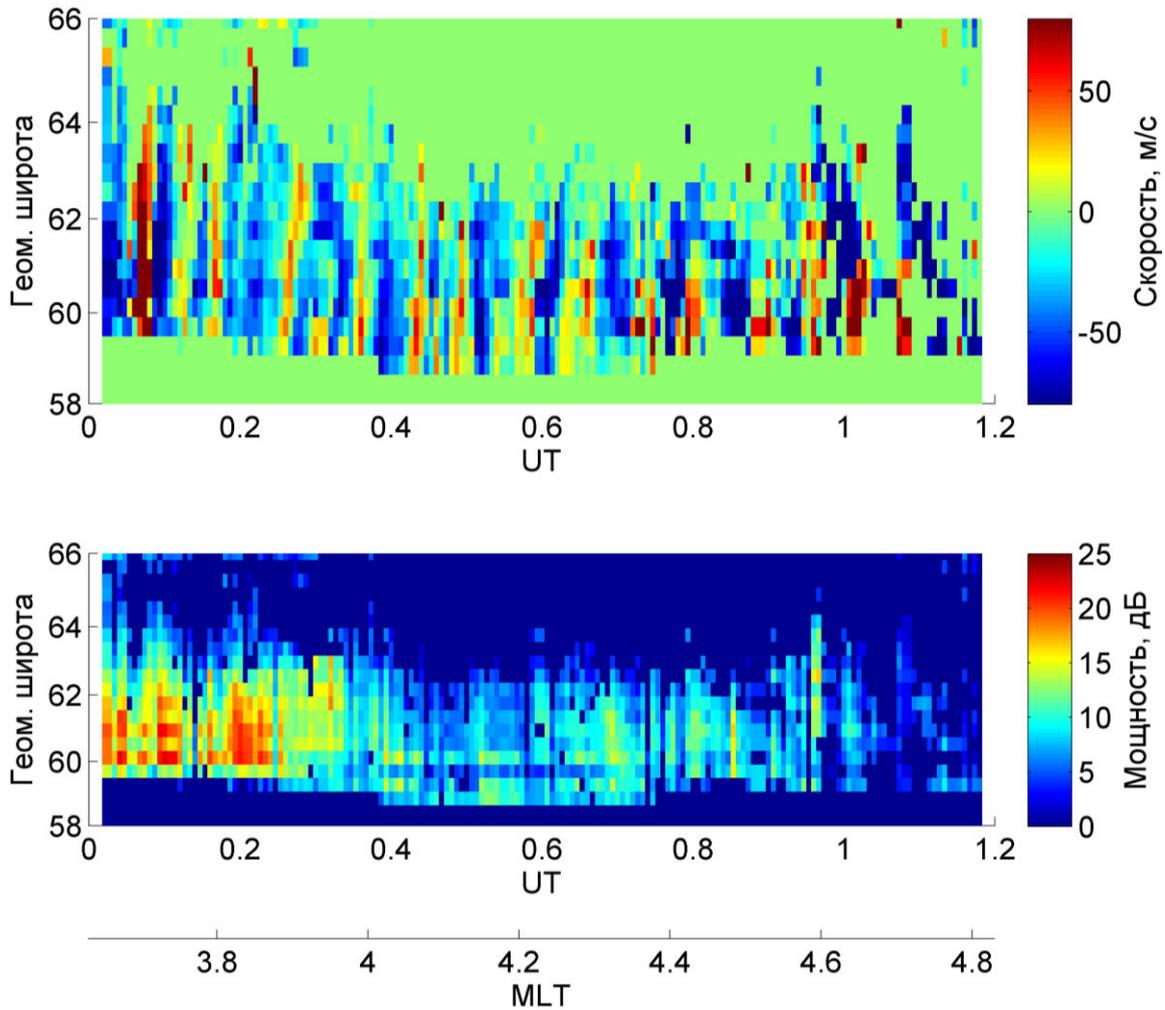


Рисунок 20. Скорость плазмы вдоль луча 0. 25 декабря 2014 г.

невысока, около  $3 \text{ см}^{-3}$ , его скорость под воздействием высокоскоростного потока из корональной дыры CН647 достигала  $550 \text{ км/с}$  (рис. 21). Авроральные индексы и данные магнитометров свидетельствуют о суббуревой активности, которая развилась в результате длительного, около 12 часов, периода направленного на юг ММП. Значения индекса SYM-H достигали  $-41 \text{ нТл}$ .

Одновременно с радаром колебания величины магнитного поля с близкой частотой были зарегистрированы на спутнике RBSP-B. В это время он также находился в послеполуночном секторе, в области  $3,0\text{--}4,1 \text{ MLT}$  и двигался в направлении Земли в диапазоне магнитных оболочек  $4,0\text{--}4,8$ .

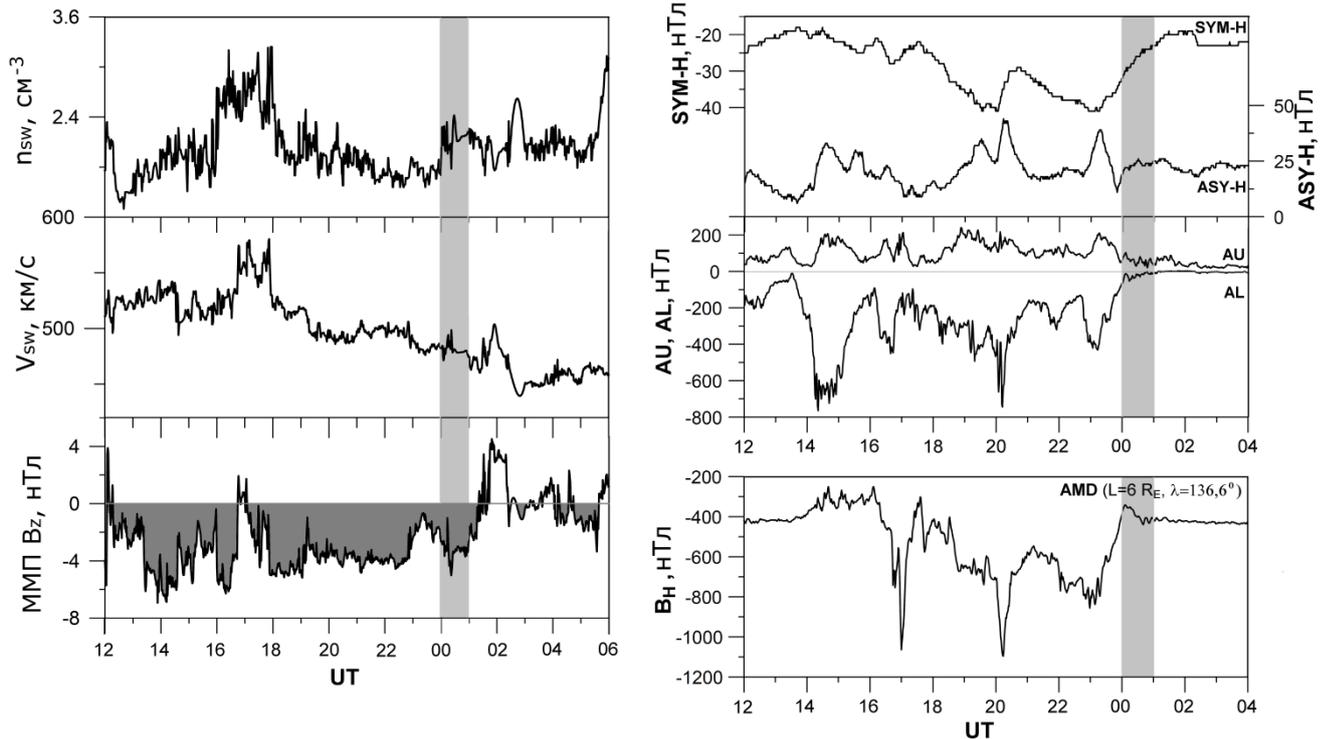


Рисунок 21. Слева: плотность и скорость солнечного ветра, вертикальная компонента ММП по данным спутника ACE. Справа: значения индексов SYM-H, ASY-H, AU и AL 25 декабря 2014 г; значения горизонтальной составляющей магнитного поля на станции Амдерма. Вертикальная полоса обозначает период времени, в течение которого наблюдались колебания скорости ионосферной плазмы.

На рис. 22 представлены колебания, зарегистрированные спутником и отфильтрованные в диапазоне Pc5, радиальной ( $B_r$ ) и продольной ( $B_l$ ) компонент магнитного поля; колебания в азимутальной компоненте значительно слабее, на рисунке они не представлены. Частота зарегистрированных спутником колебаний была  $\sim 4,2$  мГц. Также показаны вейвлет-спектры колебаний. В нижней части рисунка приведены колебания и их спектр по данным радара.

Для анализа структуры волны проведено сопоставление возмущений продольной компоненты магнитного поля с возмущениями давления частиц и потоков протонов с энергией 5,23 кэВ (рис. 23). Видно, что колебания магнитного поля находятся в противофазе с обоими параметрами. Это свойство

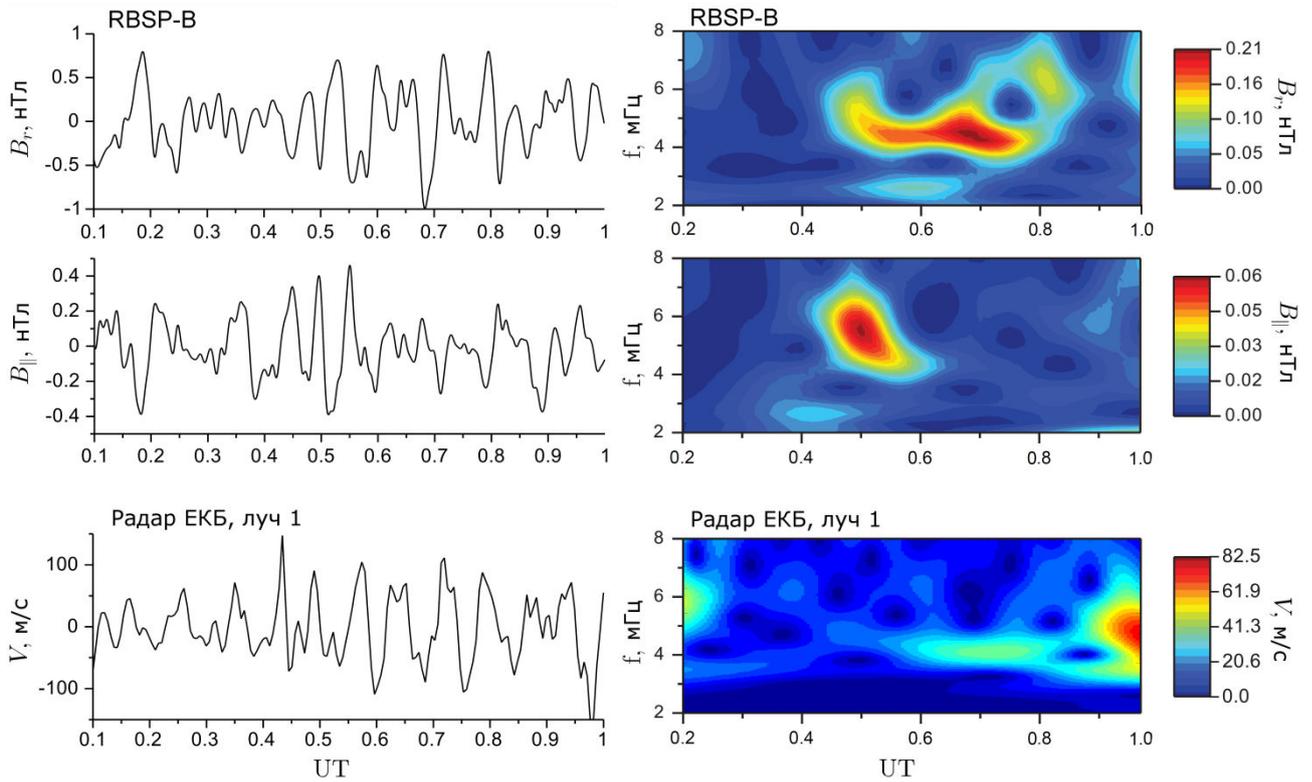


Рисунок 22. Форма сигнала и его вейвлет-преобразование для радиальной и продольной компонент магнитного поля на спутнике RBSP-B (вверху) и данных радара, луч 1, диапазон расстояний от радара, примерно соответствующий  $60,6^{\circ}$  геомагнитной широты (внизу). 25 декабря 2014 г.

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 для магнитных оболочек 4,0–4,8 (рис. 24). Она изменялась в пределах 17–28 мГц, в несколько раз превышая частоту наблюдавшейся волны.

Как и в случае 26 декабря 2014 г., анализ показывает, что наблюдаемую волну следует относить к дрейфово-компрессионной моде. Она наблюдалась на фоне суббуревой активности, имеет малую длину волны в азимутальном направлении, направление ее распространения совпадает с направлением

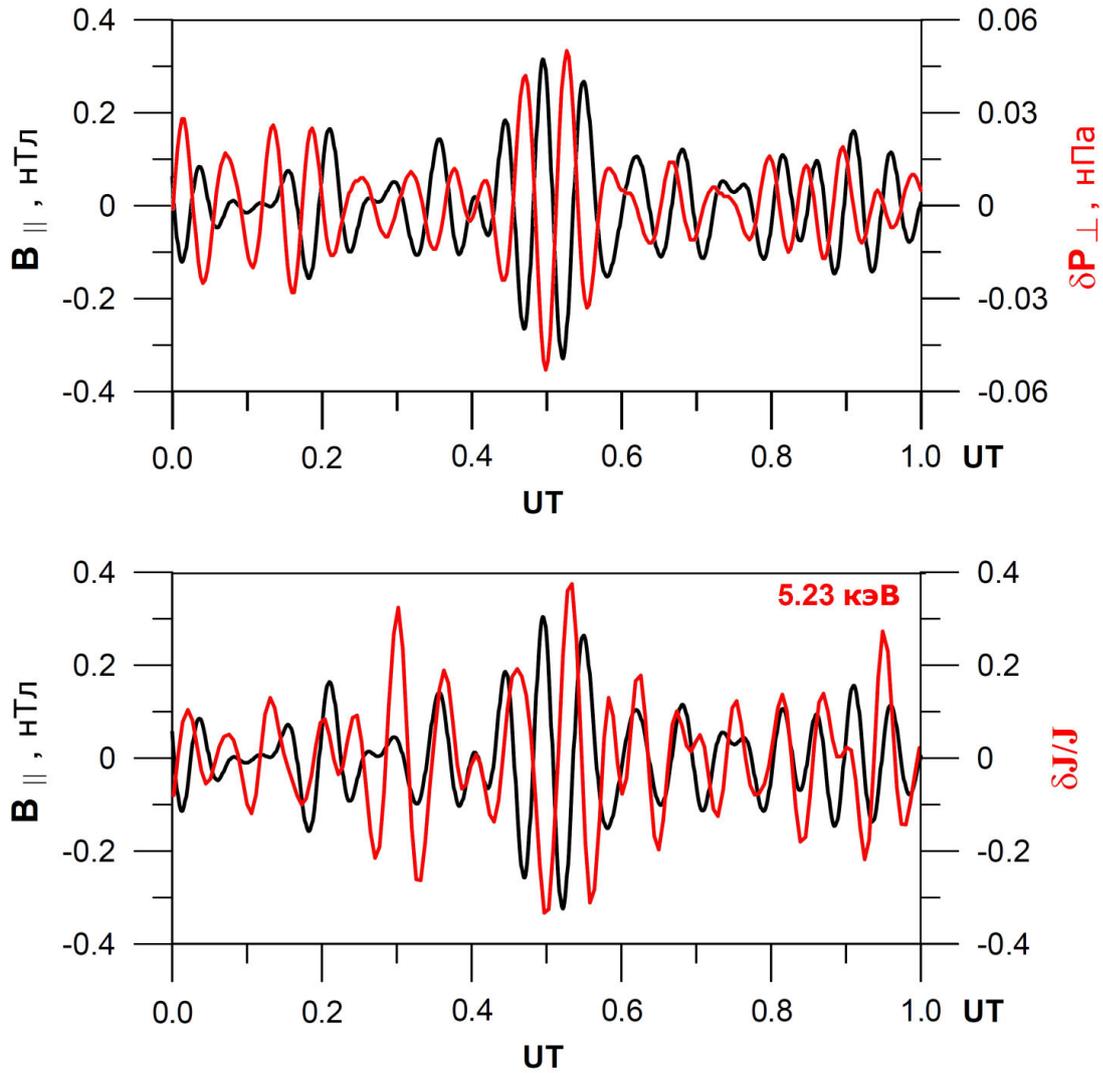


Рисунок 23. Вверху: возмущение продольной ( $B_{\parallel}$ ) компоненты магнитного поля (черным) и возмущение давления ( $\delta P_{\perp}$ , красным) по данным RBSP-B. Внизу: возмущение продольной ( $B_{\parallel}$ ) компоненты магнитного поля (черным) и возмущение потока протонов ( $\delta J/J$ , красным) с энергией 5.23 keV по данным того же спутника.

дрейфа протонов, ее частота существенно ниже альфвеновской частоты, а в данных спутников видны признаки компрессионной волны.

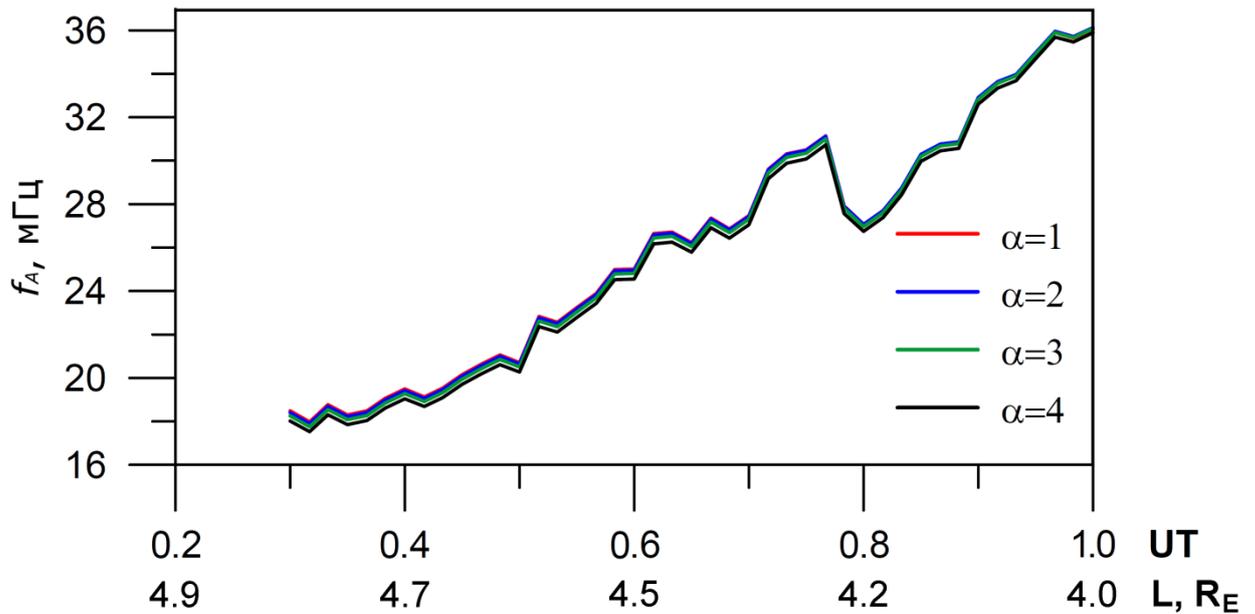


Рисунок 24. Зависимость частоты главной альфвеновской моды от номера магнитной оболочки для разных  $\alpha$  по данным спутника RBSP-B.

### 3.5. Свойства колебаний с положительными азимутальными волновыми числами

Одним из свойств магнитосферных УНЧ-колебаний с большими азимутальными волновыми числами является их преимущественное распространение на запад, в направлении дрейфа энергичных ионов, с которыми волны могут эффективно взаимодействовать [Zong et al., 2017]. Волны, распространяющиеся в обратную сторону, на восток, наблюдаются существенно реже [Eriksson et al., 2006; Le et al., 2011]. Они, в свою очередь, благодаря дрейфовому резонансу, могут взаимодействовать с электронами, скорость дрейфа которых в магнитосфере направлена также на восток. Волны, распространяющиеся на восток, зачастую наблюдаются к востоку от суббуревых инжекций [James et al., 2013; Hori et al., 2018], что подтверждает представления об энергичных электронах, попадающих в магнитосферу во время суббури, как об источнике этих волн. В работе [Hori et al., 2018] описаны колебания, которые после суббури распространялись и на запад, и на восток, при этом распространяющиеся к востоку волны взаимодействовали с потоками

электронов, дрейфующих на восток вблизи экваториальной плоскости магнитосферы.

В отношении природы волн, распространяющихся на восток, на сегодняшний день нет полной ясности. Зачастую их относят к альфвеновским волнам. Костарев и Магер [2017] показали, что дрейфово-компрессионные колебания диапазона Pc5 также могут распространяться в направлении дрейфа электронов.

В данном разделе рассмотрены колебания с положительными азимутальными волновыми числами, зарегистрированные Екатеринбургским радаром. Как видно из рисунка 12, только около 15% колебаний, рассмотренных в разделе 3.4, имеют положительные  $m$ . При рассмотрении всех случаев наблюдения волн радаром, получено близкое значение доли колебаний, распространяющихся на восток, около 13%: в рамках 39 случаев обнаружено 74 устойчивых колебаний; в девяти из этих случаев наблюдались колебания с положительными  $m$ , при этом в двух случаях были зарегистрированы по два таких колебания. Таким образом, в период наблюдения была получена информация об 11 колебаниях, распространявшихся с запада на восток. Время их наблюдения, частоты и азимутальные волновые числа приведены в таблице 2. На рисунке 25 приведен пример отфильтрованных колебаний с положительным азимутальным волновым числом. Видно, что фазовый фронт волны, зарегистрированной в поле зрения луча 0, опережает фронт волны на луче 1, расположенном восточнее.

Из приведенных здесь случаев наблюдения в пяти была возможность сравнить частоты волн с частотами альфвеновского резонанса силовых линий, рассчитанными по данным спутников, пересекавших соответствующие магнитные оболочки в секторе наблюдения. При этом в двух из них (9 декабря 2014 г. и 14 марта 2015 г.) наблюдалось два колебания с положительными  $m$ . В двух случаях частоты оказались близки к вычисленным альфвеновским частотам: 4 сентября 2014 г. частота колебания с положительным  $m$  была равна 4,8 мГц, в то время как частота резонанса силовой линии была оценена в

Таблица 2 — Параметры зарегистрированных радаром ЕКВ колебаний с положительными азимутальными волновыми числами

Дата	Время UT	$f$	$m$
21.02.2014	0145–0215	3,0	4
18.04.2014	2100–2120	3,7	22
04.09.2014	2240–2300	4,8	25
17.09.2014	2020–2045	2,5	5
21.09.2014	2025–2050	3,0	27
19.10.2014	0245–0300	3,4	17
09.12.2014	2035–2055	3,3	37
09.12.2014	2020–2045	2,4	143
30.12.2014	2030–2100	3,4	6
14.03.2015	1950–2010	3,1	6
14.03.2015	2030–2050	2,1	2

4,1 мГц; для наблюдений 21 сентября 2014 г. эти частоты равны 3 и 2,7 мГц, соответственно. В еще трех случаях, включающих в себя в сумме регистрацию пяти волн, частоты колебаний, зарегистрированных радаром, в несколько раз ниже частот альфвеновского резонанса.

Для четырех из приведенных здесь случаев было оценено радиальное волновое число: 18 апреля, 17 сентября и 19 октября 2014 г. и 14 марта 2015 г. В других случаях разность фаз 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

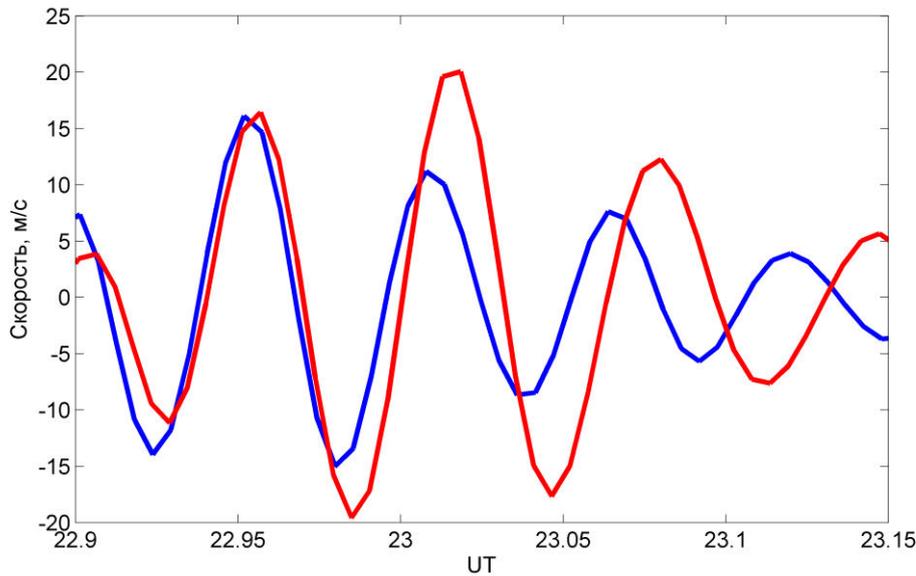


Рисунок 25. Колебания скорости ионосферной плазмы, зарегистрированные в поле зрения лучей 0 (синяя линия) и 1 (красная линия) 4 сентября 2014 г. Для наглядности ряды отфильтрованы в диапазоне 4–7 мГц.

наблюдения колебания, расчеты дают представление о нем и о направлении распространения волны вдоль меридиана. В таблице 3 показаны результаты расчетов вместе с волновыми числами в азимутальном направлении, которые определялись как

$$k_a = \frac{m}{L}. \quad (3.1)$$

Данные для 14 марта 2015 г. приведены для волны, зарегистрированной в период 1950–2010 UT, с частотой  $\sim 3$  мГц. Девятнадцатого октября 2014 г. волна изначально распространялась в меридиональной плоскости к полюсу, однако в 0251 UT радиальная компонента волнового вектора значительно уменьшилась. В таблице для этой волны приведены два значения  $k_r$ , до и после 0251 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

Таблица 3 — 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

характеризуются смешанной поляризацией в плоскости, перпендикулярной силовым линиям. В обоих этих случаях волны имеют малые значения азимутального волнового числа. В еще одном случае (18.04.2014), 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.

Колебания 19 октября 2014 г. были зарегистрированы во время восстановительной фазы слабой геомагнитной бури (минимальное значение SYM-H составило  $-35$  нТл) при резком увеличении плотности солнечного ветра до  $11 \text{ см}^{-3}$  и северном направлении ММП. Значение индекса AE находилось в пределах  $400-500$  нТл. В остальных случаях регистрации волн с положительными азимутальными волновыми числами магнитосфера находилась в невозмущенном состоянии, со значениями индекса Kp в пределах от 2+ до 3+. Значения индекса AE были в пределах  $100-600$  нТл, а концентрация частиц в солнечном ветре была  $5-10 \text{ см}^{-3}$ . Эти колебания наблюдались в периоды направленного на юг ММП.

Как показывают радарные наблюдения, волнам с малыми азимутальными волновыми числами свойственно распространение к полюсу

[Fenrich et al., 1995; Wright and Allan, 1996]. Это объясняется уменьшением частоты собственных колебаний силовых линий за границами плазмопаузы с удалением от Земли. В результате, при азимутальном распространении волны, фазовая скорость снижается с ростом широты, что приводит к распространению таких волн в направлении полюса. Результаты расчетов радиального волнового числа для приведенных случаев с малыми  $m$  — 17 сентября 2014 г. и 14 марта 2015 г., — показавшие, что волны распространялись в направлении экватор–полюс, согласуются с теорией и с ранее проводившимися наблюдениями.

Волнам с большими  $m$ , наоборот, свойственно распространение в направлении экватора [Tian et al., 1991; Yeoman et al., 1992, 2000]. Часто их генерацию внутри магнитосферы связывают с облаками заряженных частиц, дрейфующих в азимутальном направлении. В соответствии с этим, в [Mager et al., 2009] предложено объяснение свойств распространения таких волн в радиальном направлении, связанное с более высокой скоростью частиц на дальних магнитных оболочках. Это явление приводит к более высокой скорости фазового фронта на высоких широтах и соответствующему распространению волны в сторону экватора.

Случай наблюдения 19 октября 2014 г., когда волна изначально распространялась в сторону полюса, но затем фазовая скорость в направлении полюс–экватор сильно уменьшилась, согласуется с этими свойствами. Для волн, взаимодействующих с дрейфующими протонами, характерно распространение на запад. Однако в данном случае, вероятно, колебания генерировались облаком электронов, дрейфующих от области полуночного меридиана в послеполуночном секторе.

В [Takahashi et al., 1987] также допускается возможность взаимодействия волн, распространяющихся на восток, с протонами, которые движутся на восток в электрическом поле, направленном с утреннего на вечерний фланг магнитосферы. В этом случае требуется, чтобы скорость дрейфа протонов превышала фазовую скорость волны. Тогда с точки зрения неподвижного наблюдателя волна будет распространяться к востоку. Однако, выполнение

таких условий скорее возможно на дальних магнитных оболочках, обычно  $L > 7-8$ .

Волна, зарегистрированная 18 апреля 2014 г. с  $m \sim 22$  распространялась в радиальном направлении в сторону полюса. В азимутальном направлении она распространялась со стороны полуночного меридиана к полуденному. Такие свойства 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 and Klimushkin, 2008; Baddeley et al., 2004]. Колебания, во многом похожие на случай 18 апреля, описаны в [Baddeley et al., 2017]: волна, сгенерированная внутри магнитосферы, распространялась в азимутальном направлении со стороны полуночного меридиана на запад; она имела близкое по модулю значение азимутального волнового числа и, хотя характеризовалась направлением распространения к экватору, была также отнесена к резонансу силовых линий.

Таким образом, наблюдения волн с положительными азимутальными волновыми числами согласуются с предыдущими исследованиями. Часть из них, 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.

## Заключение

В ходе работы были обработаны и проанализированы данные, полученные в 2014 и 2015 гг. с помощью среднеширотного когерентного радара, расположенного под Екатеринбургом. Особенность использованных рядов данных состоит в высоком временном разрешении, которое позволяет регистрировать по доплеровскому смещению колебания скорости ионосферной плазмы в частотном диапазоне пульсаций Pc5. Такие мелкомасштабные колебания обусловлены электромагнитными пульсациями в магнитосфере. Получена компонента скоростей в направлении магнитного меридиана, соответствующая полоидальной составляющей пульсаций. Возможность получения данных с расположенных рядом лучей с высоким временным разрешением, имеющих примерно одинаковое направление, позволяет оценивать структуру волн в азимутальном направлении.

С помощью радара за период с сентября 2014 г. по март 2015 г. включительно было зарегистрировано около 40 случаев наблюдения УНЧ-волн. Колебания наблюдались в ночной магнитосфере на фоне спокойных и умеренно возмущенных геомагнитных условий. После интерполяции и фильтрации рядов данных был проведен кросс-вейвлет анализ. Были определены частоты и длительности колебательных компонент. По разности фаз между двумя соседними лучами были определены направления распространения и оценены азимутальные волновые числа колебаний. Показано, что большая часть из них, более 85%, в азимутальном направлении распространяются на запад. Для ряда случаев наблюдения волн, распространяющихся на восток, определена длина волны в меридиональной плоскости и радиальное направление распространения.

Для части случаев регистрации колебаний были доступны спутниковые измерения параметров магнитного поля и концентрации плазмы в магнитосфере в секторе проведения радарных наблюдений. Они были использованы при проведении сравнения частоты наблюдаемых с помощью радара колебаний с частотой стоячих альфвеновских волн на тех силовых линиях, в области проекции которых с помощью радара регистрировались волны.

Эта методика применялась для 33 случаев регистрации УНЧ-волн (наблюдаемых в рамках 16 случаев регистрации колебаний). Из них 28 имеют частоты существенно ниже альфвеновских, с различием величин на 40% и более. Следовательно, они не могут относиться к альфвеновской моде, к которой часто принято относить наблюдаемые с помощью радаров волны с высокими значениями азимутального волнового числа. Показано, что эти волны могут соотноситься с дрейфово-компрессионной модой. Частоты остальных пяти волн отличаются от соответствующих альфвеновских частот не более чем на 20%. Учитывая неточности использовавшихся при вычислениях моделей, эти колебания могут относиться 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: колебаний магнитного поля находятся в противофазе с возмущениями давления частиц и потоков энергичных протонов, волна распространения 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 величин на фиксированной магнитной оболочке характерна только для дрейфово-компрессионной и дрейфово-зеркальной мод. Однако тот факт, что условия возникновения дрейфово-зеркальной моды не типичны для магнитосферы, позволяет прийти к выводу о дрейфово-компрессионной моде как источнике наблюдаемой волны.

### Список литературы

Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.

Бернгардт О.И., Кутелев К.А., Куркин В.И., Гркович К.В., Ямпольский Ю.М., Кащеев А.С., Кащеев С.Б., Галушко В.Г., Григорьева С.А., Кусонский О.А. Двухпозиционная локация высокоширотных ионосферных неоднородностей с использованием декаметрового радара ЕКВ и радиотелескопа УТР-2: первые результаты // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 6. С. 433–453.

Большакова О.В., Боровкова О.К., Троицкая В.А., Клейменова Н.Г. Интенсификация геомагнитных пульсаций Pс4 в условиях спокойной магнитосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1995. Т. 35. № 3. С. 143–145.

Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации внемагнитосферного происхождения // Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. 1984. Т. 7. С. 114–151.

Гульельми А.В., Золотухина Н.А. Возбуждение альфвеновских колебаний магнитосферы асимметричным кольцевым током // Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. 1980. Вып. 50. С. 129–138.

Гульельми А.В., Калишер А.Л., Русакова Т.Б. Реакция колебаний магнитосферы в диапазоне Pс2 на изменение модуля ММП // Геомагнетизм и аэрномия. 1989. Т. 29. № 1. С. 33–37.

Золотухина Н.А. О возбуждении альвеновских волн в магнитосфере движущимся источником // Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. 1974. Вып. 34. С. 20–23.

Козлов Д.А., Леонович А.С. Трансформация и поглощение МГД-колебаний в плоскостойких моделях магнитосферы Земли // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 17. С. 102–109.

Костарев Д.В., Магер П.Н. Дрейфово-компрессионные волны, распространяющиеся в направлении дрейфа энергичных электронов в магнитосфере // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 18–27.

Леонович А.С., Мазур В.А. Собственные сверхнизкочастотные магнитозвуковые колебания ближнего плазменного слоя // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4, С. 336–343.

Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Генерация альфвеновских волн движущейся неоднородностью плазмы в магнитосфере // Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 5. С. 435–442.

Мазур В.А. Резонансное возбуждение магнитосферы гидромагнитными волнами, падающими из солнечного ветра // Физика плазмы. 2010. Т. 36, № 11. С. 1013–1023.

Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А. Продольная структура баллонных МГД возмущений в модельной магнитосфере // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 3. С. 187.

Матвеева Э.Т. Циклическая вариация активности геомагнитных пульсаций Pс1 // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. № 3. С. 455.

Соболев А.В., Бурнашев А.Н., Сергеева Г.П. Геомагнитные пульсации Pс3 и их связь с межпланетным магнитным полем / Структура и динамика геофизических явлений в высокоширотной ионосфере: Сборник научных трудов. — Якутский филиал СО АН СССР, Якутск, 1987. — 136 с.

Троицкая В.А. Короткопериодные возмущения электромагнитного поля Земли / Вопросы изучения переменных электромагнитных полей. — Наука, Москва, 1956. С. 27–61.

Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физических наук. 1969. Т. 97. С. 453–495.

Троицкая В.А., Плясова-Бакунина Т.А. Связь периодов колебаний Pс2–4 с положением границы магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1970. Т. 10. № 6. С. 1119–1121.

Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Маннинен Ю., Култима Й., Кангас Й. Сезонный ход частоты геомагнитных пульсаций Pc1 и вариации широты локализованных протонных высыпаний // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44. № 3. С. 282–287.

Afanasyeva L.T. Space-time distribution of geomagnetic pulsations and its dependence on the geomagnetic activity // *Acta Geodaetica*. 1978. V. 13. P. 239–271.

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.

Anderson B.J., M.J. Engebretson, S.P. Rounds, L.J. Zanetti, T.A. Potemra A statistical study of Pc 3–5 pulsations observed by the AMPTE/CCE Magnetic Fields Experiment, 1. Occurrence distributions // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95(A7), P. 10495–10523.

Baddeley L.J., D.A. Lorentzen, N. Partamies, W. Denig, V.A. Pilipenko, Oksavik K., X. Chen, Y. Zhang Equatorward propagating auroral arcs driven by ULF wave activity: Multipoint ground and space based observations in the dusk sector auroral oval // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122(5). P. 5591–5605.

Baddeley L.J., T.K. Yeoman, D.M. Wright, K.J. Trattner, B.J. Kellet 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.

Baker G., E.F. Donovan, B.J. Jackel A comprehensive survey of auroral latitude Pc5 pulsation characteristics // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. P. 1384.

Baker K.B., M.J. Engebretson, A.S. Rodger, R.L. Arnoldy The coherence scale length of band-limited Pc3 pulsations in the ionosphere // *Geophys Res Lett.* 1998. Vol. 25. P. 2357–2360.

Berngardt O.I., N.A. Zolotukhina, A.V. Oinats Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: first results // *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, Iss. 1(143).

Blanchard, G.T., S. Sundeen, K.B. Baker Probabilistic identification of high-frequency radar backscatter from the ground and ionosphere based on spectral characteristics // *Radio Sci.* 2009. Vol. 44. RS5012.

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

Bristow W.A., R.A. Greenwald, J.P. Villain On the seasonal dependence of medium-scale atmospheric gravity waves in the upper atmosphere at high latitudes // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101(A7). P. 15685–15699.

Chapman S., Bartels J. *Geomagnetism, Volume 1.* – Clarendon Press, Oxford, 1962. — 544 c.

Chen L., A. Hasegawa A theory of long-period magnetic pulsations, 1. Steady state excitation of field line resonance // *J. Geophys. Res.* 1974a. Vol. 79, 1024–1032.

Chen L., A. Hasegawa A theory of long-period magnetic pulsations, 2. Impulse excitation of surface eigenmode // *J. Geophys. Res.* 1974b. Vol. 79, 1033–1039.

Chen L., A. Hasegawa Kinetic theory of geomagnetic pulsations: 1. Internal excitations by energetic particles // *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, 1503–1512.

Chisham G., M. Lester, S. E. Milan, M. P. Freeman, W. A. Bristow, A. Grocott et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions // *Surv Geophys.* 2007. Vol. 28, Iss. 1. P. 33–109.

Chisham G., Orr D. Statistical studies of giant pulsations (Pgs): Harmonic mode // *Planetary and Space Science.* 1991. Vol. 39, Iss. 7. P. 999–1006.

Chisham G., D. Orr A statistical study of the local time asymmetry of Pc 5 ULF wave characteristics observed at midlatitudes by SAMNET // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102(A11). P. 24339–24350.

Clilverd M.A., et al. In-situ and ground-based intercalibration measurements of plasma density at L = 2.5 // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108(A10), P. 1365.

Cousins, E.D.P., S.G. Shepherd Statistical characteristics of small-scale spatial and temporal electric field variability in the high-latitude ionosphere // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. A03317.

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

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

Demekhov A.G. Recent progress in understanding Pc1 pearl formation // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2007. Vol. 69 P. 1609–1622.

Engebretson, M. J., W. K. Peterson, J. L. Posch, M. R. Klatt, B. J. Anderson, C. T. Russell, H. J. Singer, R. L. Arnoldy, H. Fukunishi Observations of two types of Pc 1–2 pulsations in the outer dayside magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107(A12), P. 1451.

Eriksson, P. T. I., L. G. Blomberg, A. D. M. Walker, K.-H. Glassmeier Poloidal ULF oscillations in the dayside magnetosphere: a Cluster study // *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 2679–2686.

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

Fenrich F.R., J.C. Samson, G. Sofko, R.A. Greenwald 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.

Foster G. Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series // *Astronomical Journal.* 1996. V. 112. P. 1709–1729.

Fraser B.J., J.C. Samson, Y.D. Hu, R.L. McPherron, C.T. Russell Electromagnetic ion cyclotron waves observed near the oxygen cyclotron frequency by ISEE 1 and 2 // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97(A3). P. 3063–3074.

Gauld J.K., T.K. Yeoman, J.A. Davies, S.E. Milan, F. Honary SuperDARN HF propagation and absorption response to the substorm expansion phase // *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1631–1645.

Glassmeier K.-H., S. Buchert, U. Motschmann, A. Korth, A. Pedersen Concerning the generation of geomagnetic giant pulsations by drift-bounce resonance ring current instabilities // *Ann. Geophys.* 1999. Vol. 17. P. 338–350.

Greenstadt E.W., M.M. Mellott, R.L. McPherron, C.T. Russell, H.J. Singer, D.J. Knecht Transfer of pulsation-related wave activity across the magnetopause: observations of corresponding spectra by ISEE1 and ISEE2 // *Geophys Res Lett.* 1983. Vol. 10. P. 659–662.

Greenwald R.A., K.B. Baker, J.R. Dudeney, M. Pinnock, T.B. Jones, E.C. Thomas, J.P. Villain, J.C. Cerisier, C. Senior, C. Hanuise, R.D. Hunsucker, G. Sofko, J. Koehler, E. Nielsen, R. Pellinen, A.D.M. Walker, N. Sato, H. Yamagishi DARN/SuperDARN // *Space Science Reviews.* 1995. Vol. 71(1). P. 761–796.

Grossman A., Morlet J. Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape // *SIAM J. Math. Anal.* 1984. V. 15 (4). P. 723–736.

Gupta J.C. Long period Pc5 pulsations // *Planet. Space Sci.* 1975. V. 23. P. 733–750.

Hao Y.X., Q.-G. Zong, Y. F. Wang, X.-Z. Zhou, H. Zhang, S.Y. Fu, et al. Interactions of energetic electrons with ULF waves triggered by interplanetary shock: Van Allen Probes observations in the magnetotail // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2014. Vol. 119. P. 8262–8273.

Harrold B.G., J.C. Samson Standing ULF modes of the magnetosphere: A theory // *Geophys Res Lett.* 1992. Vol. 19. P. 1811–1814.

Hasegawa A. Drift mirror instability in the magnetosphere // *Physics of Fluids.* 1969. Vol. 12. P. 2642.

Hori T., N. Nishitani, S.G. Shepherd, J.M. Ruohoniemi, M. Connors, M. Teramoto, et al. Substorm-associated ionospheric flow fluctuations during the 27 March 2017 magnetic storm: SuperDARN-Arased conjunction // *Geophysical Research Letters.* 2018. Vol. 45. P. 9441–9449.

Hughes J. M., W.A. Bristow, R.A. Greenwald, R.J. Barnes Determining characteristics of HF communications links using SuperDARN // *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1023–1030.

Hurricane O.A., R. Pellat, F.V. Coroniti The kinetic response of a stochastic plasma to low frequency perturbations // *Geophys. Res. Lett.* 1994, Vol. 21(4). P. 253–256.

Hughes W.J., D.J. Southwood The screening of micropulsation signals by the atmosphere and ionosphere // *Journal of Geophysical Research*. 1976. Vol. 81(19). P. 3234–3240.

Frissell N.A., J.B.H. Baker, J.M. Ruohoniemi, A.J. Gerrard, E.S. Miller, J.P. Marini, M.L. West, W.A. Bristow Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by the midlatitude Blackstone SuperDARN radar // *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119. P. 7679–7697.

Jacobs J.A., Y. Kato, S. Matsushita, V.A. Troitskaya Classification of geomagnetic micropulsations // *J. Geophys. Res.* 1964. Vol. 69. P. 180–181.

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

Kaye S.M., M.G. Kivelson Observations of Pc 1–2 waves in the outer magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 4267–4276.

Kepko L., M. Kivelson Generation of Pi2 pulsations by bursty bulk flows // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104(A11). P. 25021–25034.

Kepko L., H.E. Spence, H.J. Singer ULF waves in the solar wind as direct drivers of magnetospheric pulsations // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29(8). P. 39-1–39-4.

Kessel R.L. Solar wind excitation of Pc5 fluctuations in the magnetosphere and on the ground // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A04202.

Kivelson M.G., J. Etcheto, J.G. Trotignon Global compressional oscillations of the terrestrial magnetosphere: The evidence and a model // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89, P. 9851.

Kivelson M.G., D.J. Southwood Resonant ULF waves: A new interpretation // *Geophys. Res. Lett.* 1985. Vol. 12. P. 49–52.

Klimushkin D.Yu., P.N. Mager 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 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 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(7). P. 1099–1106.

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

Kokobun S. Statistical Characteristics of Pc5 Waves at Geostationary Orbit // *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 1985. V. 37. P. 759–779.

Kremser G., A. Korth, J.A. Fejer, B. Wilken, A.V. Gurevich, E. Amata Observations of quasi-periodic flux variations of energetic ions and electrons associated with Pc 5 geomagnetic pulsations // *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86(A5). P. 3345–3356.

Le G., S.-H. Chen, Y. Zheng, C.T. Russell, J.A. Slavin, C. Huang, S.M. Petrinec, T.E. Moore, J. Samson, H.J. Singer, K. Yumoto Coordinated polar spacecraft, geosynchronous spacecraft, and ground-based observations of magnetopause processes and their coupling to the ionosphere // *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22 P. 4329–4350.

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.

Lee L.C., R.L. Albano, J.R. Kan Kelvin-Helmholtz instability in the magnetopause-boundary layer region // *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86(A1). P. 54–58.

Leonovich A. S., D. A. Kozlov, V. A. Pilipenko Magnetosonic resonance in a dipole-like magnetosphere // *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24. P. 2277–2289.

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

Li, Y., B. J. Fraser, F. W. Menk, D. J. Webster, K. Yumoto Properties and sources of low and very low latitude Pi2 pulsations // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103(A2). P. 2343–2358.

Mager P.N., D.Y. Klimushkin 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., D.Yu. Klimushkin, N. Ivchenko On the equatorward phase propagation of high- $m$  ULF pulsations observed by radars // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2009. Vol. 71, I. 16. P. 1677–1680.

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

Mager P.N., O.I. Bergardt, D.Yu. Klimushkin, N.A. Zolotukhina, O.V. Mager First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: Ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2015. Vol. 130–131 (0). P. 112–126.

Mathie R.A., I.R. Mann, F.W. Menk, D. Orr Pc5 ULF pulsations associated with waveguide modes observed with the IMAGE magnetometer array // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104(A4). P. 7025–7036.

Matsuoka H., A.S. Yukimatu, H. Yamagishi, N. Sato, G.J. Sofko, B.J. Fraser et al. Coordinated observations of Pc3 pulsations near cusp latitudes // *J Geophys Res.* 2002. Vol. 107. P. 1400.

Menk F. W., D. Orr, M. A. Clilverd, A. J. Smith, C. L. Waters, B. J. Fraser Monitoring spatial and temporal variations in the dayside plasmasphere using geomagnetic field line resonances // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, P. 19955–19970.

McDiarmid D.R., W. Allan Simulation and analysis of auroral radar signatures generated by a magnetospheric cavity mode // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95(A12). P. 20911–20922.

McPherron R. L. Magnetic Pulsations: Their Sources and Relation to Solar Wind and Geomagnetic Activity // *Surveys in Geophysics.* 2005. Vol. 26. P. 545 – 592.

Menk F.W. Magnetospheric ULF waves: a review / *The Dynamic Magnetosphere* под ред. Liu W., Fujimoto M. — Springer Science & Business Media, 2011. – 368 с.

Naim H., M.F. Bashir, G. Murtaza On the drift magnetosonic waves in anisotropic low beta plasmas // *Physics of Plasmas*. 2014. Vol. 21 (10). P. 102–112.

Nielsen E. The STARE system and some of its applications / *IMS Source Book*. – AGU, Washington, D.C., USA, 1982. — P. 213–224.

Nishitani N., J.M. Ruohoniemi, M. Lester, J.B.H. Baker, A.V. Koustov, S.G. Shepherd, et al. Review of the accomplishments of mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radars // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2019. Vol. 6, Iss. 1.

Nosé M., T. Iyemori, M. Sugiura, J.A. Slavin A strong dawn/dusk asymmetry in Pc5 pulsation occurrence observed by the DE-1 satellite // *G. Research Lett.* 1995. Vol. 22. P. 2053–2056.

Olson J.V., G. Rostoker Longitudinal phase variations of Pc 4–5 micropulsations // *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83(A6). P. 2481–2488.

Perraut S., R. Gendrin, P. Robert, A. Roux, C. de Villedary, D. Jones ULF waves observed with magnetic and electric sensors on GEOS-1 // *Space Sci. Rev.* 1978. Vol. 22. P. 347.

Pikkarainen, T., J. Kangas, B. Kiselev, N. Maltseva, R. Rakhmatulin, S. Solovjev Type IPDP magnetic pulsations and the development of their sources // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88(A8). P. 6204–6212.

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

Ponomarenko P.V., St-Maurice J.-P., Waters C. L., Gillies R.G., Koustov A.V. Refractive index effects on the scatter volume location and Doppler velocity estimates of ionospheric HF backscatter echoes // *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. P. 4207–4219.

Potapov A.S., V.A. Mazur Pc3 pulsations: From the source in the upstream region to Alfvén resonances in the magnetosphere. Theory and observations // *Geophysical Monograph*. 1994. Vol. 81. P. 135–145.

Prikryl P., R.A. Greenwald, G.J. Sofko, J.-P. Villain, C.W.S. Ziesolleck, E. Friis-Christensen Solar-wind driven pulsed magnetic reconnection at the dayside magnetopause, Pc5 compressional oscillations, and field line resonances // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 17307–17322.

Prikryl P., G. Provan, K.A. McWilliams, T.K. Yeoman Ionospheric cusp flows pulsed by solar wind Alfvén waves // *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 161–174.

Rae I.J., F.R. Fenrich, M. Lester, K.A. McWilliams, J.D. Scudder Solar wind modulation of cusp particle signatures and their associated ionospheric flows // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. A03223.

Rae I.J., I.R. Mann, C.E.J. Watt, L.M. Kistler, W. Baumjohann Equator-S observations of drift mirror mode waves in the dawnside magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. A11203.

Ribeiro A.J., J.M. Ruohoniemi, J.B.H. Baker, L.B.N. Clausen, S. de Larquier, R.A. Greenwald A new approach for identifying ionospheric backscatter in midlatitude SuperDARN HF radar observations // *Radio Sci.* 2011. Vol. 46. RS4011.

Rosenbluth M.N. Magnetic trapped-particle modes // *Phys. Rev. Lett.* 1981. Vol. 46. P. 1525–1528.

Rostoker G., B.T. Sullivan Polarization characteristics of Pc5 magnetic pulsations in the dusk hemisphere // *Planet. Space Sci.* 1987. Vol. 35. P. 429–438.

Ruohoniemi J.M., R.A. Greenwald, K.B. Baker, J.C. Samson HF radar observations of Pc-5 field line resonances in the midnight early morning MLT sector // *J Geophys Res.* 1991. Vol. 96. P. 15697–15710.

Ruohoniemi J.M., R.A. Greenwald, K.B. Baker, J.P. Villain, M.A. McCready Drift motions of small-scale irregularities in the high-latitude F region: An experimental comparison with plasma drift motions // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92(A5), P. 4553–4564.

Saito T. Geomagnetic pulsations // *Space Science Reviews.* 1969. Vol. 10. P. 319–412.

Samson J.C., J.A. Jacobs, G. Rostoker Latitude-dependent characteristics of long-period geomagnetic micropulsations // *J. Geophys. Res.* 1971. Vol. 76(16) P. 3675–3683.

Samson J. C., R. A. Greenwald, J. M. Ruohoniemi, K. B. Baker High-frequency radar observations of atmospheric gravity waves in the high-latitude ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1989. Vol. 16, Iss. 8. P. 875–878.

Samson J.C., Harrold B.G., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Walker A.D.M. Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1992. Vol. 25. P. 3701–3704.

Samson J.C., T.J. Hughes, F. Creutzberg, D.D. Wallis, R.A. Greenwald, J.M. Ruohoniemi Observations of a detached, discrete arc in association with field line resonances // *J Geophys Res.* 1991. Vol. 96. P. 15683–15695.

Shepherd S.G. Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: definition and functional approximations // *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119. P. 1–21.

Sibeck D. G., W. Baumjohann, R.C. Elphic, D.H. Fairfield, J.F. Fennell, W.B. Gail, L.J. Lanzerotti, R.E. Lopez, H. Luehr, A.T.Y. Lui, C.G. MacLennan, R.W. McEntire, T.A. Potemra, T.J. Rosenberg, K. Takahashi The magnetospheric response to 8-minute period strong-amplitude upstream pressure variations // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94. P. 2505–2519.

Singer, H. J., W. J. Hughes, P. F. Fougere, D. J. Knecht // The localization of Pi2 pulsations: Ground-satellite observations // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88(A9). P. 7029–7036.

Southwood D. J. Some features of field line resonances in the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1974. Vol. 22. P. 483–491.

Southwood D.J. Low frequency pulsation generation by energetic particles // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1980. Suppl. II. Vol. 32. P. 75–88.

Stephenson J.A.E., A.D.M. Walker HF radar observations of Pc5 ULF pulsations driven by the solar wind // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. P. 1297.

Stocker A.J., Arnold N.F., Jones, T.B. The synthesis of travelling ionospheric disturbance (TID) signatures in HF radar observations using ray tracing // *Ann. Geophys.* 2000. Vol. 18. P. 56–64.

Sucksdorff, E. Occurrences of rapid micropulsations at Sodankylä during 1932 to 1935 // *Terrest. Magn. Atmospheric Electr.* 1936. Vol. 41. P. 337–344.

Sutcliffe, P.R. The association of harmonics in Pi2 power spectra with the plasmopause // *Planet. Space Sci.* 1975. V. 23. P. 1581–1587.

Takahashi K., C.Z. Cheng, R.W. McEntire, L.M. Kistler Observation and theory of Pc 5 waves with harmonically related transverse and compressional components // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95(A2). P. 977–989.

Takahashi K., R.L. McPherron Harmonic structure of Pc 3–4 pulsations // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87(A3). P. 1504–1516.

Takahashi, K., R.L. McPherron Standing hydromagnetic oscillations in the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1984. Vol. 32. P. 1343–1359.

Takahashi, K., S. Ohtani, B. J. Anderson Statistical analysis of Pi 2 pulsations observed by the AMPTE CCE Spacecraft in the inner magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100(A11). P. 21929–21941.

Takahashi K., Ukhorskiy A.Y. Solar wind control of Pc5 power at geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. A11205.

Takahashi K., Ukhorskiy A.Y. Timing analysis of the relationship between solar wind parameters and geosynchronous Pc5 amplitude // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A12204.

Thébault E., C. Finlay, C. Beggan, P. Alken, J. Aubert, et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // *Earth Planets and Space.* 2015. Vol. 67, P.79.

Tian M., T. Yeoman, M. Lester, T. Jones Statistics of Pc 5 pulsation events observed by SABRE // *Planet. Space Sci.* 1991. Vol. 39(9). P. 1239–1247.

Uspensky M.V., Kustov A.V., Sofko G.J., Koehler J.A., Villain J.P., Hanuise C., Ruohoniemi J.M., Williams P.J.S. Ionospheric refraction effects in slant range profiles of auroral HF coherent echoes // *Radio Sci.* 1994. Vol. 29(2). P. 503–517.

Viall N.M., L. Kepko, H.E. Spence Relative occurrence rates and connection of discrete frequency oscillations in the solar wind density and dayside magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. A01201.

Villante U. Ultra low frequency waves in the magnetosphere / *Handbook of the solar-terrestrial environment* под ред. Kamide Y., Chian A. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. – 539 с.

Walker A.D.M., R.A. Greenwald, A. Korth, G. Kremser STARE and GEOS 2 observations of a storm time Pc 5 ULF pulsation // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87(A11). P. 9135–9146.

Walker A., R. Greenwald, W. Stuart, C. Green Stare auroral radar observations of Pc 5 geomagnetic pulsations // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84(A7). P. 3373–3388.

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

Wang C.-P., S.G. Zaharia, L.R. Lyons, V. Angelopoulos Spatial distributions of ion pitch angle anisotropy in the near-Earth magnetosphere and tail plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118(1). P. 244–255.

Wharton S.J., D.M. Wright, T.K. Yeoman, M.K. James, J.K. Sandhu Cross-phase determination of ULF wave harmonic frequencies and their associated plasma mass density distributions // *J. Geophys. Res.* 2018. Vol. 123.

Woch J., G. Kremser, A. Korth A comprehensive investigation of compressional ULF waves observed in the ring current // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95(A9). P. 15113–15132.

Yeoman T.K., M. James, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin SuperDARN observations of high- $m$  ULF waves with curved phase fronts and their interpretation in terms of transverse resonator theory. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. A06,231.

Yeoman T.K., D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager Intermediate- $m$  ULF waves generated by substorm injection: a case study // *Annales Geophysicae*. 2010. Vol.28. P. 1499–1509.

Yeoman T.K., D. Orr Phase and spectral power of mid-latitude Pi2 pulsations: Evidence for a plasmaspheric cavity resonance // *Planet. Space Sci.* 1989. V. 37. N. 11. P. 1367–1383.

Yeoman T., M. Tian, M. Lester, T. Jones A study of Pc5 hydromagnetic waves with equatorward phase propagation // *Planet. Space Sci.* 1992. Vol. 40(6). P. 797–810.

Yeoman T.K., Wright D.M. ULF waves with drift resonance and drift-bounce resonance energy sources as observed in artificially-induced HF radar backscatter // *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19. P. 159–170.

Yeoman T.K., D.M. Wright, P.J. Chapman, A.B. Stockton-Chalk High-latitude observations of ULF waves with large azimuthal wavenumbers // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105(A3). P. 5453–5462.

Walker A.D.M., Greenwald R.A. Pulsation structure in the ionosphere derived from aurora radar data // *J. Geomag. Geoelectr.* 1980. Vol. 32. P. 111–127.

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

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

Wright D.M., T.K. Yeoman CUTLASS observations of a high- $m$  ULF wave and its consequences for the DOPE HF Doppler sounder // *Ann. Geophys.* 1999. Vol. 17. P. 1493–1497.

Ziesolleck C.W.S., D.R. McDiarmid Statistical survey of auroral latitude Pc 5 spectral and polarization characteristics // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100(A10). P. 19299–19312.

Zolotukhina, N.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Pc5 waves generated by substorm injection: a case study // *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. P. 2053–2059.

Zong Q., Rankin R., Zhou X. The interaction of ultra-low-frequency Pc3–5 waves with charged particles in Earth's magnetosphere // *Rev. Mod. Plasma Phys.* 2017. Vol. 1. P. 10.

Zybin K. Y. On the polarization characteristics of middle latitude geomagnetic micropulsations // *Indian J. Meteorol. Geophys.* 1967. Vol. 18. P. 349–354.