

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

На правах рукописи
УДК 533.951



Рубцов Александр Валерьевич

**Особенности поляризации и пространственного распределения
ультранизкочастотных волн в магнитосфере Земли
по данным космических аппаратов**

Специальность 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2023

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

Научный руководитель:

Климущин Дмитрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

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

Козырева Ольга Васильевна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, главный научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится «23» января 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01, созданного при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://ru.iszf.irk.ru> и в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Ю.В. Ясюкевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Магнитосфера Земли — область пространства, в которой магнитное поле Земли управляет потоками заряженных частиц — является природным щитом на пути частиц солнечного ветра, защищая технологические системы и здоровье людей [Baker, 1996; Пилипенко, 2021], поэтому изучение процессов, влияющих на её состояние, является важной научной и практической задачей. За крупномасштабный перенос энергии в магнитосфере отвечают электромагнитные волны в диапазоне ультранизких частот (УНЧ), который простирается от 1,7 мГц до 5 Гц (период волны 0,2–600 с). Возмущения в этом диапазоне также называют геомагнитными пульсациями. Эти волны описываются с помощью магнитной гидродинамики (МГД) [Alfvén, 1942] и кинетической теории [Chen, Hasegawa, 1991].

УНЧ-волны разделяют на непрерывные пульсации (Pc) и нерегулярные пульсации (Pi) [Jacobs et al., 1964; Гульельми, Троицкая, 1973]. Особый интерес для исследования представляют самые низкочастотные волны, классифицируемые как Pc4 (6,7–22 мГц) и Pc5 (1,7–6,7 мГц), потому что они являются собственными колебаниями силовых линий, чья длина волны сравнима с размером магнитосферы. В соответствии с величиной азимутального волнового числа m эти волны могут быть крупномасштабными ($|m| \sim 1$) и мелкомасштабными ($|m| \gg 1$). Устоялось представление, что первые являются тороидальными альфвеновскими волнами, генерируемыми источниками из солнечного ветра, а вторые — полоидальными, которые возбуждаются внутренними плазменными неустойчивостями [Glassmeier, 1995]. Азимутально-мелкомасштабными также являются дрейфово-компрессионные и дрейфово-зеркальные волны, описываемые кинетической теорией [Климушкин и др., 2021].

За последнее десятилетие был осуществлён запуск множества спутниковых миссий с целью исследования магнитосферы Земли и, в том числе, УНЧ-волн. Изучение волн по спутниковым данным возможно двумя способами: детальным анализом отдельных случаев и статистическим исследованием за продолжительный период времени. Первый способ позволяет проследить динамику волны и её взаимодействие с заряженными частицами, что особенно актуально для компрессионных волн, природа которых является объектом споров. В то же время, такой способ упускает из виду пространственный масштаб

возмущения и никак не характеризует регулярность того или иного механизма взаимодействия. Этим недостатком лишён статистический подход, который обобщает результаты наблюдений отдельных случаев и позволяет построить пространственное распределение УНЧ-волн в магнитосфере и выявить его связь с состоянием солнечного ветра и явлениями геомагнитной активности, такими как магнитные бури и суббури [McPherron, 2005; Мишин и др., 2013; Гульельми, Потапов, 2021].

Однако при анализе наблюдений зачастую упускается из виду развитие теории за последние двадцать лет. Исследователи используют простые модели и грубые приближения, из-за чего часть наблюдаемых явлений остаётся неинтерпретируемой. В частности, это касается вопроса о механизмах генерации компрессионных волн и их распределении в магнитосфере, о разделении УНЧ-волн по поляризации из-за разных источников генерации и о влиянии положения плазмопаузы на пространственное распределение волн.

Описанные проблемы определяют актуальность настоящей диссертационной работы, в которой представлены как исследования отдельных наблюдений альфвеновских и дрейфово-компрессионных волн, так и статистическое исследование пространственного распределения УНЧ-волн, включая анализ частоты волны и поляризации.

Цель работы

Целью работы является сопоставление существующих теоретических представлений о видах УНЧ-волн, их параметрах и механизмах генерации со свойствами и поведением этих волн в магнитосфере Земли по результатам наблюдений на космических аппаратах.

В соответствии с поставленной целью решались следующие конкретные задачи:

- Анализ частных случаев наблюдения УНЧ-волн по данным спутников: определение параметров волны и взаимодействующей с волной популяции частиц, динамики их изменения, источника энергии для генерации волны, механизма генерации и сравнение с теоретическими характеристиками МГД-волн и дрейфово-компрессионных волн, соответствующими параметрам плазмы в области наблюдения;
- Поиск зависимости между источником генерации волн и поляризацией волны с помощью статистики наблюдения УНЧ-волн за несколько обзоров магнитосферы, включая выделение областей пространства с наибольшей частотой появления волн и её распределение по геомагнитной широте;

- Определение влияния уровня геомагнитной активности на распределение УНЧ-волн в магнитосфере и роли плазмопаузы в генерации этих волн.

Научная новизна

- Впервые показано, что градиентная неустойчивость генерирует дрейфово-компрессионные волны;
- Выявлено, что процесс изменения поляризации альфвеновских волн в пространстве и во времени происходит регулярно и приводит к перемешиванию тороидальных и полоидальных волн, изначально возбуждаемых разными источниками;
- Продемонстрировано изменение пространственного распределения частоты появления УНЧ-волн в магнитосфере при разных уровнях геомагнитной активности, включая зависимость от положения плазмопаузы.

Научная и практическая значимость работы

Значимость работы заключается в обнаружении новых фактов о параметрах УНЧ-волн и их распределении в магнитосфере, а также в непосредственном подтверждении генерации дрейфово-компрессионных волн. Эти результаты указывают направления будущих исследований динамики УНЧ-волн и будут способствовать уточнению моделей переноса энергии, осуществляемого этими волнами в масштабах всей магнитосферы. По итогам работы показана необходимость описания взаимодействия УНЧ-волн с частицами в процессе изменения поляризации и важность положения плазмопаузы в распределении волн.

Методы исследования

В диссертации анализируются измерения магнитного и электрического полей, потоков ионов и электронов, а также макроскопических параметров плазмы, полученные спутниковыми миссиями THEMIS, Van Allen Probes, GOES, Arase. Измерения дополнены информацией о межпланетном магнитном поле и параметрах солнечного ветра из базы данных OMNIWeb и об уровне геомагнитной активности по индексам *SYM-H*, *SME*, *AE*, *AU*, *AL*. Методы обработки данных включают в себя преобразование системы координат, вейвлет-анализ, применение эффекта конечного гирорадиуса и процедуру автоматизированного отбора волн для статистического исследования. По измерениям параметров плазмы

в точке наблюдения спутников проводятся вычисления условий дрейфового и баунс-дрейфового резонанса, собственных частот полоидальной и тороидальной альфвеновских волн и дрейфово-компрессионной волны, а также проверяется выполнение условий неустойчивости для раскачки волны.

Положения, выносимые на защиту:

1. На основе спутниковых наблюдений и численных расчётов показано, что градиентная неустойчивость в магнитосфере приводит к раскачке не только альфвеновских волн, но и дрейфово-компрессионных волн;

2. Обнаружено, что УНЧ-волны в диапазонах Pc4 и Pc5 не разделяются на отдельные кластеры по поляризации из-за разных источников энергии, как общепринято, а представляют собой единый кластер с нормальным распределением и максимумом в области поперечных волн с равной амплитудой азимутальной и радиальной составляющих;

3. Установлено, что расширение плазмосферы в длительные периоды спокойной геомагнитной обстановки влечёт за собой уменьшение области генерации УНЧ-волн и наоборот, сжатие плазмосферы в результате роста уровня геомагнитной активности приводит к увеличению области генерации волн, т. е. плазмопауза выступает в роли внутренней границы области генерации волн диапазонов Pc4 и Pc5.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов определяется использованием измерений широко известных, откалиброванных и многократно проверенных научных инструментов на борту космических аппаратов миссий THEMIS, Van Allen Probes, GOES, Arase; применением современных методов анализа данных и сопоставлением результатов с предсказаниями теории. Полученные выводы дополняют и расширяют результаты предыдущих исследований, а все различия получили объяснения с точки зрения природы наблюдаемых явлений и особенностей используемых данных и методов обработки.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или при его определяющем участии. Первичная обработка и анализ данных выполнены автором описанными выше методами с помощью компьютерных программ собственной разработки.

Автор принимал определяющее участие в интерпретации полученных результатов и в научных публикациях по теме диссертации является основным автором.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях: XIV Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, 2017); VI Международная молодёжная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (Москва, 2017); Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» и Конференция молодых учёных «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2017, 2019, 2022); 5th Cluster-THEMIS Workshop (Ханья, Греция, 2018); 12th International Conference and School “Problems of Geocosmos” (Санкт-Петербург, 2018); Annual seminar “Physics of Auroral Phenomena” (Апатиты, 2019, 2022); 14th International Conference on Substorms (Тромсё, Норвегия, 2019); Ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, 2021, 2022, 2023); 3rd ISEE Symposium, PWING-ERG Conference and School on the Inner Magnetosphere (Нагоя, Япония, 2021); Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI (Хайдарабад, Индия, 2021); 44th COSPAR Scientific Assembly (Афины, Греция, 2022); AGU Chapman Conference on Advances in Understanding Alfvén Waves in the Sun and the Heliosphere (Берлин, Германия, 2023); Семинары ИСЗФ СО РАН, ИФЗ РАН и ISEE NU.

Публикации

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, включенных в список ВАК или в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

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

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В Главе 1 приведены теоретические представления о магнитогидродинамических (МГД) волнах в магнитосфере, используемые для вычисления собственной частоты волны при заданных параметрах плазмы, и кратко описаны ключевые механизмы взаимодействия УНЧ-волн с заряженными частицами.

В случае, когда азимутальное волновое число $m \rightarrow 0$, силовая линия колеблется в азимутальном направлении. Такие колебания называют тороидальными альфвеновскими волнами. При $m \rightarrow \infty$ колебания происходят в радиальном направлении и представляют собой полоидальные альфвеновские волны. В обоих случаях собственная частота колебаний убывает при приближении к Земле. В приближении азимутально-мелкомасштабных волн быстрый магнитный звук локализован около магнитопаузы, а частота медленного магнитного звука в магнитосфере слишком мала. Корректное описание компрессионных волн и взаимодействия УНЧ-волн с заряженными частицами требует кинетического подхода, в котором появляются дрейфово-компрессионные и дрейфово-зеркальные волны.

В Разделе 1.1 приведены обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие структуру тороидальной и полоидальной альфвеновских волн в двух приближениях. В предположении идеальной проводимости ионосферы и путем подстановки в качестве параметров плазмы результатов измерений на спутниках, уравнения решаются численно в дипольной модели. Полученные собственные частоты тороидальной и полоидальной альфвеновских волн можно затем сопоставить с наблюдаемой частотой волны.

Вычисление собственной частоты дрейфово-компрессионной волны является более сложной задачей, поэтому удобно знать её качественные отличия от альфвеновской волны. Во-первых, дрейфово-компрессионная волна может иметь более низкую частоту, чем альфвеновская на той же L -оболочке. Во-вторых, собственные частоты альфвеновских волн слабо зависят от m , а частота дрейфово-компрессионной волны очень чувствительна к значению m . В-третьих, обе волны могут быть возбуждены градиентной

неустойчивостью, но при противоположных условиях: если альфвеновская волна генерируется отрицательным радиальным градиентом температуры [Southwood, 1976], то дрейфово-компрессионная — при росте температуры с расстоянием от Земли [Mager et al., 2013].

В Разделах 1.2 и 1.3 приведены условие резонанса волны с заряженными частицами и условие неустойчивости соответственно. По первому условию можно оценить вид резонанса (дрейфовый или баунс-дрейфовый) и величину m из данных о частоте волны и энергии резонансных частиц. Условие неустойчивости позволяет определить, приводит ли конкретный резонанс к раскачке волны. Раскачка происходит, когда либо у функции распределения частиц по энергиям имеется инверсный участок в области резонанса (инверсная или пучковая неустойчивость), либо при сильном радиальном градиенте функции распределения, знак которого совпадает со знаком m (градиентная неустойчивость).

В Главе 2 приведены основные методы обработки данных, полученных спутниками миссий THEMIS [Angelopoulos, 2008], Van Allen Probes (ранее RBSP) [Mauk et al., 2013], GOES и Arase (ранее ERG) [Miyoshi et al., 2018], применяемые для изучения УНЧ-волн в магнитосфере. Каждый космический аппарат оборудован приборами для измерения векторов магнитного и электрического полей, потоков электронов и ионов. Окружающая спутник плазма характеризуется давлением и концентрацией, которые предоставляют операторы миссий.

В Разделе 2.1 описываются системы координат, в которых предоставляются исходные данные, и переход к ортогональной криволинейной системе, ориентированной вдоль фонового магнитного поля, которая используется для разделения колебаний магнитного поля по направлениям на азимутальные (соответствуют тороидальным альфвеновским волнам), радиальные (полоидальным) и продольные (компрессионным).

Раздел 2.2 посвящён вейвлет-преобразованию. Вводится понятие амплитудной вейвлет-функции (WAF) [Foster, 1996], которая нормирована таким образом, что в случае монохроматической синусоидальной волны значение WAF максимально и равно амплитуде волны на частоте волны. Кроме того, WAF является комплексной, что позволяет вычислять разность фаз волн, наблюдаемых в двух временных рядах, путём комплексного сопряжения их WAF. Разность фаз между ортогональными компонентами магнитного и электрического полей даёт информацию о продольной структуре волны, а между электрическим полем и потоком частиц — об энергии резонансных частиц.

В Разделе 2.3 показаны способы вычисления азимутального волнового числа m по фазовой задержке колебаний магнитного поля на двух и более спутниках и с помощью эффекта конечного гирорадиуса. Особое внимание уделено применению последнего. Из-за ларморовского вращения заряженные частицы попадают в детектор спутника с определённого направления — тогда, зная энергию и питч-угол частицы, можно восстановить положение центра ларморовского кружка (ведущего центра). Фазовая задержка между колебаниями потоков частиц от ведущих центров к западу и к востоку от спутника пропорциональна m . Полученные значения сопоставляются с оценками из условия резонанса, представленного в разделе 1.2.

В Разделе 2.4 описана процедура отбора волн в диапазонах Pc4 и Pc5 для статистического исследования. В качестве исходных данных используются измерения вектора магнитного поля при $L = 4-10$, чтобы исключить влияние доплеровского эффекта вблизи перигея орбиты спутника и уменьшить вероятность измерений за пределами магнитосферы.

Процедура отбора применяется для каждой компоненты магнитного поля независимо и включает в себя два основных элемента: поиск пиков частоты в спектрах и отсечку по амплитуде. Для пиков частоты вводится условие на узость пика, поскольку волны типа Pc должны быть квази-синусоидальными. Затем исходный сигнал фильтруется полосовым фильтром для выделения колебаний на частоте пика. Если амплитуда такой волны превышает 0,25 нТл в течение, по крайней мере, пяти периодов волны, она удовлетворяет критериям отбора. В конце происходит объединение волн, обнаруженных в разных компонентах в одно и то же время с частотой, отличающейся не более чем на 2 мГц, а по величине средней амплитуды за время наблюдения волны устанавливается доминирующее направление колебаний, которое определяет тип волны: тороидальная, полоидальная или компрессионная.

С целью исключения попадания инструментальных шумов и квазипериодических импульсов весь набор волн был проверен вручную с помощью визуального осмотра.

В Главе 3 подробно проанализированы три частных случая наблюдения УНЧ-волн, в которых показано, что градиентная неустойчивость приводит к генерации и полоидальной альфвеновской волны и дрейфово-компрессионной волны.

В Разделе 3.1 рассмотрена полоидальная волна, которая фиксировалась семью спутниками миссий Van Allen Probes, THEMIS и GOES на дневной стороне необычно долго в

течение ~ 15 ч (Рисунок 1, *a*). Объединённые наблюдения со спутников показали, что частота волны уменьшается от Земли с 20 до 5 мГц, что соответствует оценке собственной частоты второй гармоники полюидальной альфвеновской волны (Рисунок 1, *б, в*).

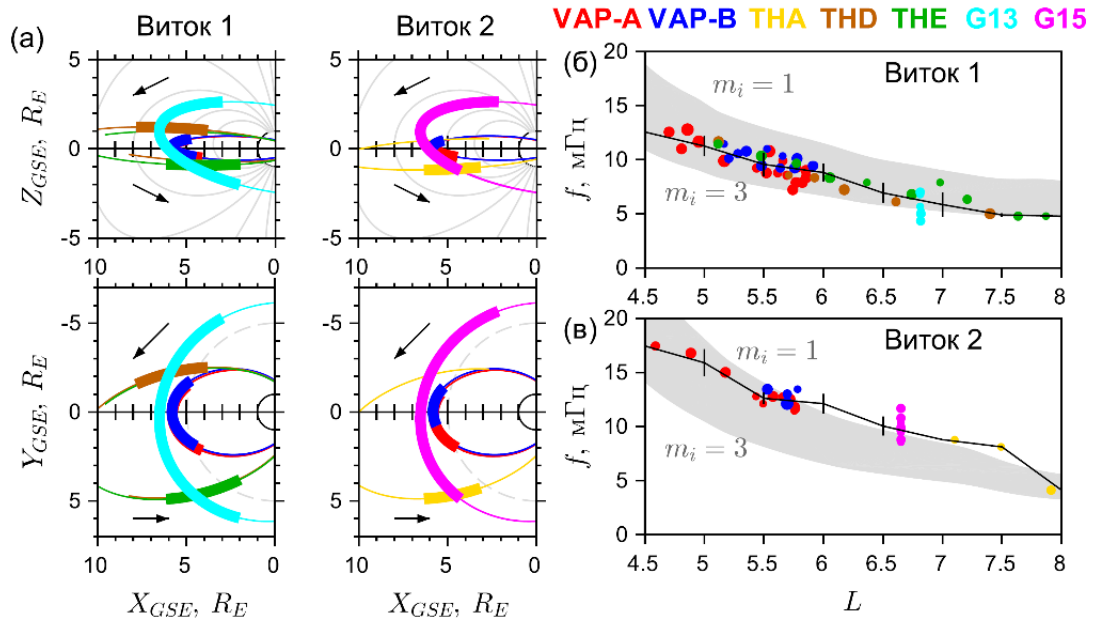


Рисунок 1. Наблюдение альфвеновской волны 25 февраля 2014 г. (*a*); орбиты спутников Van Allen Probe A (красный цвет) и B (синий), THEMIS A (жёлтый), D (коричневый) и E (зелёный), GOES 13 (голубой) и 15 (розовый) в плоскости XZ (сверху) и XY (снизу) системы GSE. Стрелки показывают направление движения спутников. Утолщения обозначают интервалы наблюдения волны. Левый и правый столбцы соответствуют измерениям на двух последовательных витках орбиты Van Allen Probes. Точками показаны частоты, извлечённые из вейвлет-спектров радиальной компоненты магнитного поля, в зависимости от L -оболочки для первого (*б*) и второго (*в*) витков. Чёрная линия — частота волны, усреднённая с шагом $0,5 R_E$. Серая область — диапазон собственных частот полюидальной альфвеновской волны для средней массы ионов 1–3 а.е.м.

Альфвеновская волна модулировала потоки протонов в диапазоне энергий 40–180 кэВ (Рисунок 2, *a*). Фазовая задержка между азимутальным электрическим полем E_a и возмущённым потоком протонов δJ достигает 90° для протонов с энергией 100 ± 20 кэВ, что позволяет считать эту энергию резонансной (Рисунок 2, *б*). Распределение потока протонов по питч-углу α для резонансной энергии выявило колебания при $\alpha = 40^\circ - 60^\circ$ и $\alpha = 120^\circ - 140^\circ$, но колебания при $\alpha = 90^\circ$ отсутствовали. Причём поток $\alpha < 90^\circ$ находится в противофазе с потоком $180^\circ - \alpha$ (Рисунок 2, *в*), что свидетельствует о баунс-дрейфовом

резонансе со второй гармоникой полоидальной волны. Используя эффект конечного гирорадиуса, мы получили $m = -209 \pm 31$, что согласуется с величиной $m = -220 \pm 30$, полученной из условия баунс-дрейфового резонанса, и подтверждает наше предположение о механизме взаимодействия волны с частицами.

Для рассматриваемой волны никаких инверсных участков в функции распределения F не обнаружено, но было показано, что данная волна генерируется градиентной неустойчивостью из-за большого отрицательного градиента $\partial F/\partial L$ и величины m (Рисунок 2, *г*). Таким образом, градиентная неустойчивость, которая возникла на фазе восстановления магнитной бури, была источником энергии для наблюдавшейся альфвеновской волны.

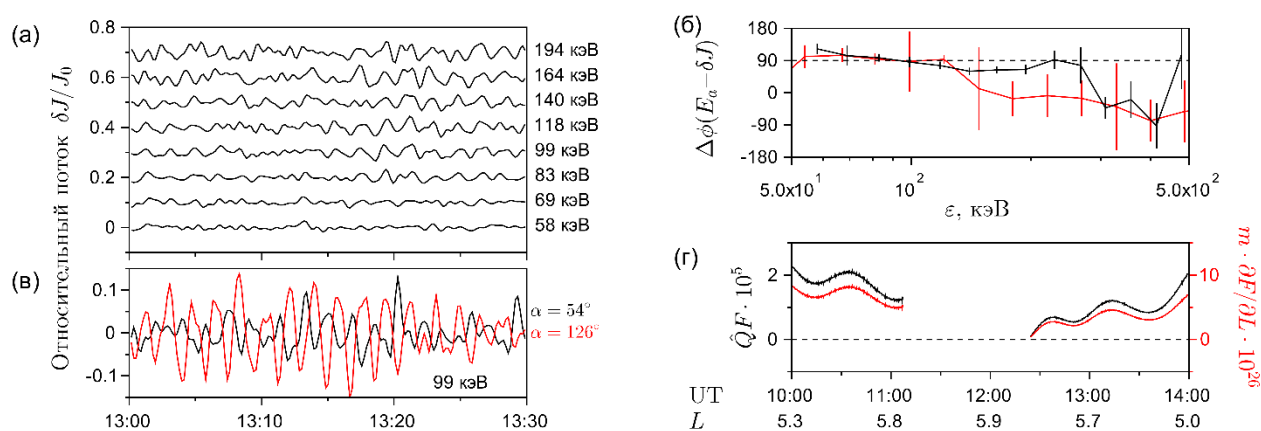


Рисунок 2. Данные относительного потока протонов $\delta J/J_0$ со спутника Van Allen Probe B с энергией 58–194 (а) и 99 кэВ и питч-углами $\alpha = 54^\circ$ и $\alpha = 126^\circ$ (в). Разность фаз $\Delta\phi$ между E_a и $\delta J/J_0$, усреднённая в интервале 12:45–12:55 UT (б) по измерениям инструментами MagEIS (чёрная линия) и RBSPICE TOFxE (красная линия); полосы ошибок соответствуют величине среднеквадратичного отклонения. Условие неустойчивости (чёрная линия) и радиальный градиент функции распределения (красная линия) (г). Область апогея орбиты ($L > 5,85$) исключена из-за неопределённости вычисления радиального градиента.

В Разделе 3.2 приведено первое прямое наблюдение дрейфово-компрессионной волны космическим аппаратом. Была использована уникальная конфигурация пяти спутников миссии THEMIS, когда они следовали друг за другом по одной орбите с расстоянием между парой спутников от ~ 1000 км до нескольких R_E . Колебания плазменного давления δP и продольной компоненты магнитного поля b_{\parallel} находились в противофазе, что свидетельствует о диамагнитном характере волны (Рисунок 3, а). Одновременно с волной

спутники зафиксировали облако ионов с энергией 10–140 кэВ, образовавшееся в результате двух суббуревых инжекций (Рисунок 3, б). Азимутальная скорость облака соответствует дрейфовой скорости протонов с энергией 25 ± 6 кэВ, которые сильнее всего были модулированы волной при $\alpha = 90^\circ$, что говорит о дрейфовом резонансе волны с частицами.

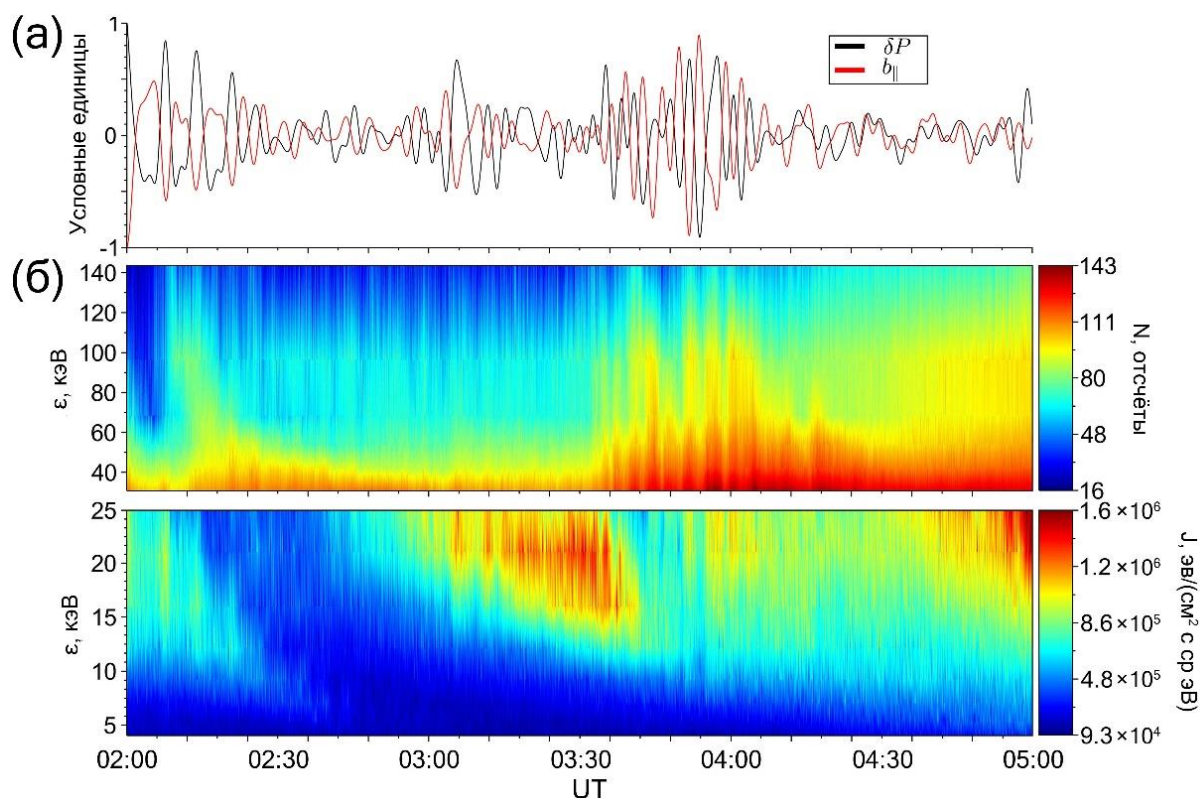


Рисунок 3. Взаимодействие компрессионной волны с протонами по данным THEMIS C 21 мая 2007 г.: колебания давления плазмы (чёрная кривая) и продольной компоненты магнитного поля (красная кривая) (а); дифференциальный поток энергии по данным инструмента ESA (энергии 4–25 кэВ) и количество отсчётов детектора SST (энергии 30–143 кэВ) (б).

Используя близость трёх спутников друг к другу, мы вычислили поперечные компоненты волнового вектора и выявлена линейная зависимость между азимутальным волновым числом m и частотой волны f (Рисунок 4). После получения этой характерной особенности и исключения других интерпретаций (альфвеновская или дрейфово-зеркальная волна) был сделан вывод о том, что данная волна является дрейфово-компрессионной.

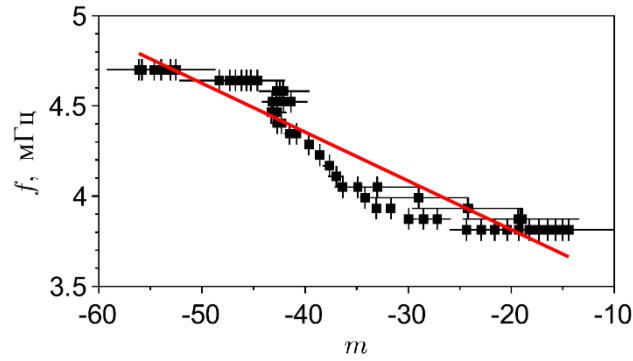


Рисунок 4. Зависимость частоты волны f от азимутального волнового числа m показана точками; красная линия — модель линейной регрессии.

Наличие облака энергичных ионов привело к увеличению параметра β и образованию положительного радиального градиента температуры (Рисунок 5). Поскольку инверсные участки в функции распределения отсутствовали, реализовался механизм градиентной неустойчивости. Как показано для максвелловского распределения [Klimushkin, Mager, 2011], такая неустойчивость может генерировать альфвеновские волны при отрицательном радиальном градиенте температуры плазмы и дрейфово-компрессионные волны — при положительном. Таким образом, наблюдавшаяся волна является дрейфово-компрессионной, генерированной градиентной неустойчивостью из-за дрейфового резонанса с инжектированными суббурей ионами.

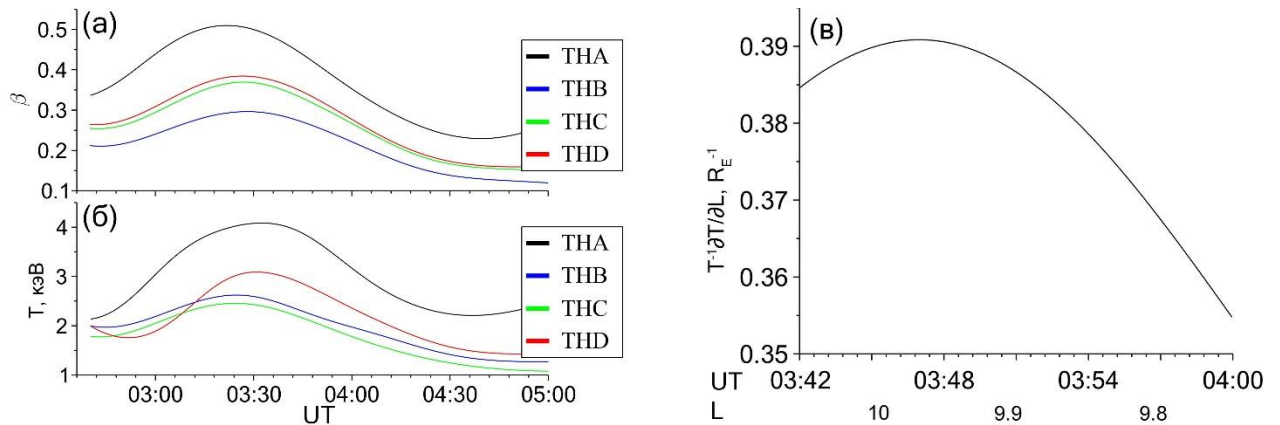


Рисунок 5. Динамика макроскопических параметров плазмы: β (а) и температура протонов T (б) по данным спутников THEMIS А (чёрный), В (синий), С (зелёный) и D (красный). Радиальный градиент температуры $T^{-1}\partial T/\partial L$, по данным THEMIS С с 03:42 до 04:00 UT (в).

Раздел 3.3 представляет ещё одно наблюдение компрессионной волны, однако в этот раз более точные детекторы заряженных частиц спутника *Agase* позволили проследить механизм её возбуждения и то, с какими популяциями частиц она взаимодействует. Компрессионная волна модулировала потоки протонов с энергиями от 10 до 40 кэВ, причём потоки при $\alpha = 90^\circ$ модулированы сильнее всего, что указывает на дрейфовый резонанс. Из условия дрейфового резонанса m меняется от -158 до -119 , а согласно эффекту конечного гирорадиуса — от -130 до -104 , что подтверждает предположение о механизме взаимодействия волны с частицами.

Впервые было проведено сравнение наблюдаемой частоты волны и собственной частоты дрейфово-компрессионной волны, вычисленной из дисперсионного уравнения, полученного в работе [Mager et al., 2013]. Получение теоретической оценки частоты вблизи апогея было затруднено из-за сложности вычисления радиальных градиентов, поэтому использовались приближения: предположение строго радиального движения спутника и предположение о нулевых градиентах. Истинное значение находится между этими двумя оценками (Рисунок 6). Полученные оценки частоты дрейфово-компрессионной волны хорошо согласуются с наблюдениями, в то время как широкополосный характер наблюдаемой волны и малая анизотропия плазмы исключают возможность отождествить её с альфвеновской или дрейфово-зеркальной волной.

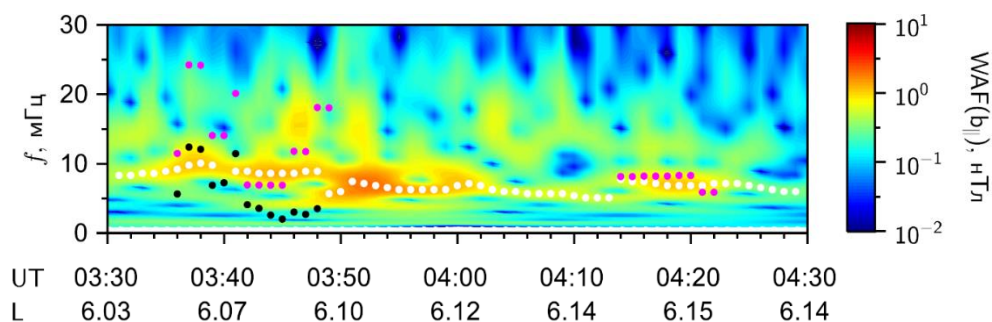


Рисунок 6. Сравнение частот. Амплитудная вейвлет-функция (WAF) b_{\parallel} показана цветом. Белые точки показывают частоту максимума WAF с шагом 1 мин. Чёрные точки — оценка частоты дрейфово-компрессионной волны в случае радиальных градиентов температуры и концентрации, вычисленных в предположении строго радиального движения спутника. Пурпурные точки — частота при нулевых радиальных градиентах.

Рисунок 7, *a* показывает, что у функции распределения F отсутствуют инверсные участки. Величина радиального градиента несколько раз за время наблюдения меняет

знак (Рисунок 7, б), в результате чего выполняется условие неустойчивости (Рисунок 7, в). Таким образом, окончательно подтверждено возбуждение дрейфово-компрессионной волны градиентной неустойчивостью.

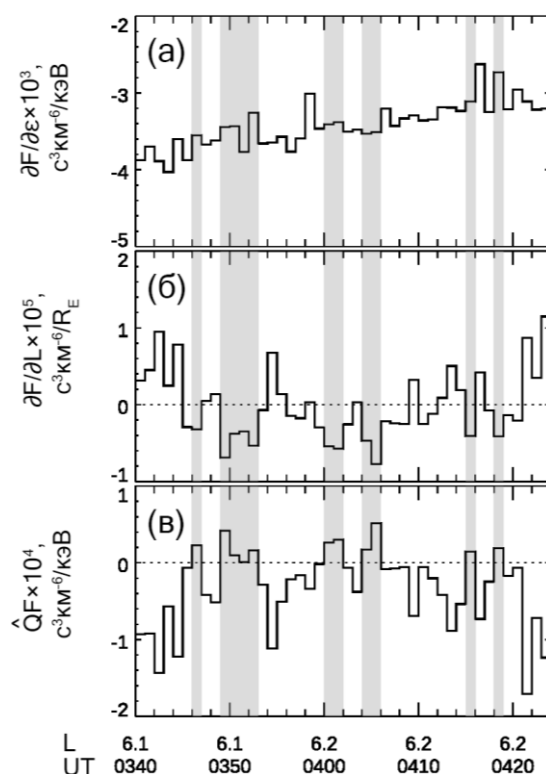


Рисунок 7. Взаимодействие компрессионной волны с протонами 19 ноября 2018 г. по данным спутника Arase. Усреднённые за 1 мин. производные $\partial F/\partial \varepsilon$ (а) и $\partial F/\partial L$ (б); условие неустойчивости (в). Серые области показывают $\hat{Q}F > 0$.

В Главе 4 описано статистическое исследование распределения УНЧ-волн в магнитосфере Земли с использованием данных космического аппарата Arase. Был выбран период с марта 2017 по декабрь 2020 г., за который спутник совершил три полных обзора магнитосферы. Наклон орбиты Arase до $|MLAT| = 40^\circ$ позволяет наблюдать магнитосферу на L -оболочках больше 10. Всего было обнаружено 12977 волн, считая гармоники одной волны отдельно, или 5585 волн, если объединять волны с разными частотами, но одной поляризации, наблюдавшиеся в один и тот же временной интервал (волны с несколькими гармониками).

Показано, что, несмотря на различное распределение в пространстве тороидальных, полоидальных и компрессионных волн, которое обычно связывают с разными источниками генерации [Glassmeier, 1995], распределение волн по поляризации имеет один

кластер с максимумом в области смешанной поперечной поляризации, когда амплитуды колебаний в радиальном и азимутальном направлении равны.

В Разделе 4.1 описано распределение тороидальных волн (средняя амплитуда колебаний в азимутальном направлении является наибольшей, $\langle b_a \rangle > \langle b_r \rangle, \langle b_{\parallel} \rangle$). Чаще всего спутник наблюдал их в вечернем, предполуночном и утреннем секторах на $L > 7$, где Arase достигал высоких широт. **Раздел 4.2** демонстрирует распределение полоидальных волн в магнитосфере (средняя амплитуда колебаний в радиальном направлении является наибольшей, $\langle b_r \rangle > \langle b_a \rangle, \langle b_{\parallel} \rangle$). Полоидальные волны концентрируются вдоль пути дрейфа ионов с полуночи к полудню. **В Разделе 4.3** показано распределение компрессионных волн (средняя амплитуда продольных колебаний является наибольшей, $\langle b_{\parallel} \rangle > \langle b_a \rangle, \langle b_r \rangle$), которые имеют наименьшую частоту появления и наблюдаются только вблизи геомагнитного экватора, $|MLAT| < 10^\circ$.

Раздел 4.4 посвящен анализу поляризации волн, обнаруженных Arase. Рисунок 8, *a* является схематичным изображением, помогающим понять распределение данных, показанное на рис. 8, *б*. Ядро распределения расположено вдоль линии $\langle b_r \rangle / \langle b_a \rangle = 1$ (Рисунок 8, *б*). Полученный результат можно объяснить изменением поляризации волны с полоидальной на тороидальную и обратно в процессе её распространения. В этом случае тороидальные волны, возбуждённые внешним источником, преобразуются в полоидальные волны, а генерированные внутренним источником полоидальные волны становятся тороидальными [Крылов и др., 1981; Leonovich, Mazur, 1993; Mager, Klimushkin, 2021]. Спутник наблюдает преобразование на разных этапах, а большая статистика приводит к нормальному распределению около $\langle b_r \rangle / \langle b_a \rangle = 1$. Сдвиг распределения в сторону тороидальных волн можно объяснить увеличением амплитуды волны при её распространении от полоидальной резонансной поверхности к тороидальной [Klimushkin, 2000].

В Главе 5, на основе набора данных из главы 4, анализируется распределение УНЧ-волн в магнитосфере и положение плазмопаузы при разном уровне геомагнитной активности. В период с марта 2017 по декабрь 2020 г. Arase совершил 6933 пролёта от Земли и к Земле; по данным электронной концентрации были обнаружены 3516 пересечений плазмопаузы.

Чтобы охарактеризовать геомагнитную обстановку во время наблюдения волны, используется индекс *SME*, усреднённый за время наблюдения волны. Он показывает высокоширотные возмущения, связанные с суббуревой активностью, включая инъекции

плазмы во внутреннюю магнитосферу из магнитного хвоста. Спокойные условия наблюдения волны соответствуют $SME \leq 100$ нТл, а возмущённые — $SME > 100$ нТл.

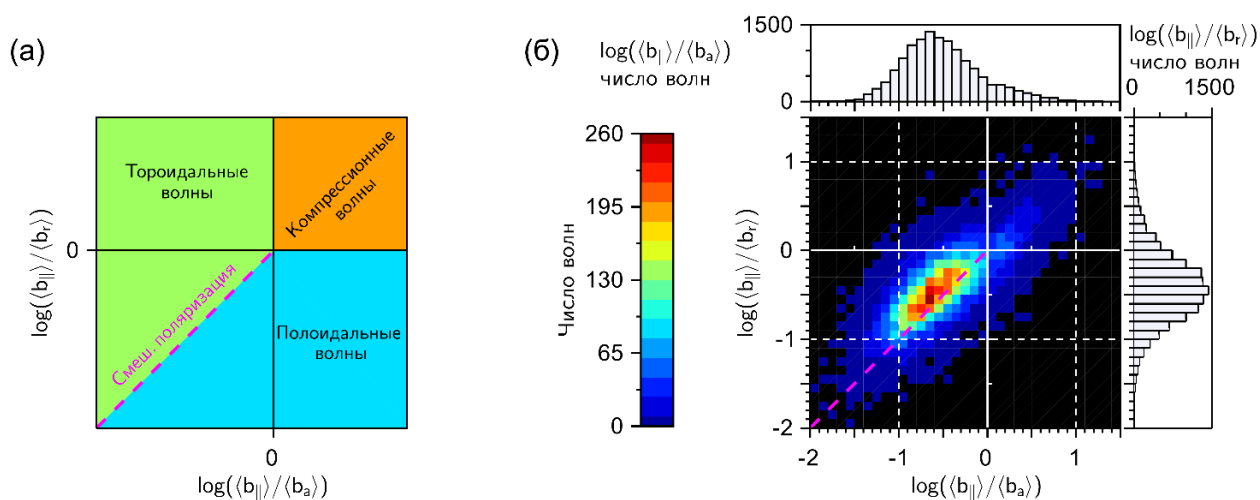


Рисунок 8. Распределение поляризации УНЧ-волн в магнитосфере по данным Arase: схематичное изображение (а) и статистическое распределение (б) для всего набора данных. Отношение средних амплитуд вариаций магнитного поля вдоль силовой линии и в азимутальном направлении $\langle b_{\parallel} \rangle / \langle b_a \rangle$ против отношения средних амплитуд вариаций магнитного поля вдоль силовой линии и в радиальном направлении $\langle b_{\parallel} \rangle / \langle b_r \rangle$. Верхняя гистограмма показывает распределение значений $\langle b_{\parallel} \rangle / \langle b_a \rangle$, правая гистограмма — $\langle b_{\parallel} \rangle / \langle b_r \rangle$. Пурпурная штриховая линия обозначает смешанную поляризацию поперечных волн, $\langle b_r \rangle / \langle b_a \rangle = 1$. Чёрный цвет указывает на отсутствие волн с данным соотношением амплитуд.

Раздел 5.1 посвящен методам определения положения плазмопаузы. Используется её классическое определение по падению электронной концентрации в пять и более раз на расстоянии $0,5 R_E$ [Carpenter, Anderson, 1992] и оценка положения плазмопаузы с помощью эмпирической модели New Solar Wind-driven Global Dynamic Plasmapause (NSW-GDP), зависящей от скорости солнечного ветра, z -компоненты межпланетного магнитного поля и индексов геомагнитной активности $SYM-H$ и AE [Zhang et al., 2017; He et al., 2017].

В **Разделах 5.2, 5.3 и 5.4** описано распределение тороидальных, полоидальных и компрессионных волн соответственно в возмущённых и спокойных геомагнитных условиях. Во всех случаях частота появления волн в возмущённое время намного больше, чем в спокойное. При любых условиях области высокой частоты появления волн сохраняются

в утреннем секторе для тороидальных волн и в дневном секторе — для полоидальных и компрессионных, что может говорить о внешнем источнике возбуждения, не связанном с геомагнитными возмущениями. В то же время, компрессионные волны в вечернем и ночном секторах практически полностью исчезают, что подтверждает их буревую природу.

Раздел 5.5 содержит анализ распределения частоты волны f в магнитосфере, полезный для понимания механизмов генерации УНЧ-волн. Рисунок 9 показывает пространственные распределения средней частоты волны $\langle f_{wave} \rangle$ для тороидальных, полоидальных и компрессионных волн в возмущённых и спокойных геомагнитных условиях. Для его построения использовалось среднее положение спутника во время наблюдения волны: средняя L -оболочка и среднее MLT.

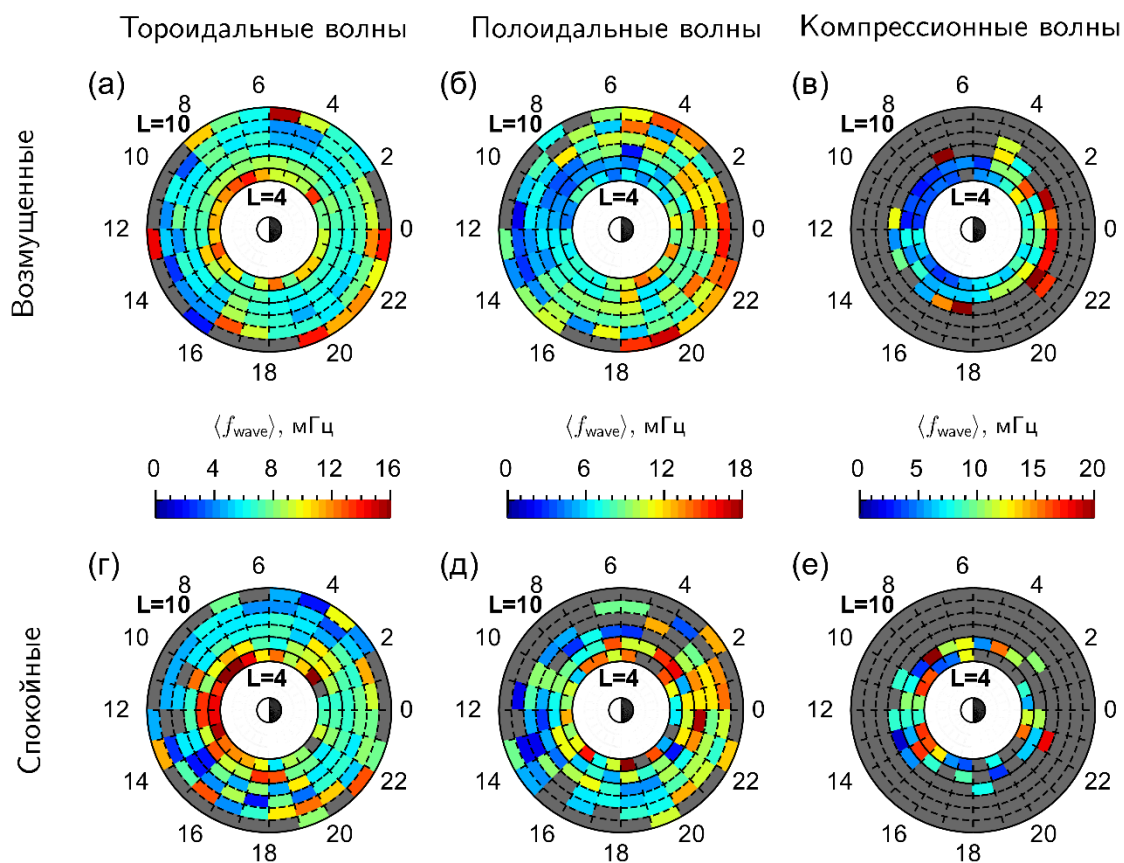


Рисунок 9. Пространственное распределение средней частоты волны $\langle f_{wave} \rangle$ для тороидальных (а, г), полоидальных (б, д) и компрессионных (в, е) волн во время возмущённых (а–в) ($SME > 100$ нТл) и спокойных (г–е) ($SME \leq 100$ нТл) геомагнитных условий.

Тороидальные волны обладают признаком альфвеновского резонанса: $\langle f_{wave} \rangle$ растёт к Земле (Рисунок 9, а, г), что наиболее очевидно в дневной магнитосфере. Распределение $\langle f_{wave} \rangle$ полоидальных волн не имеет явного характера альфвеновского резонанса

(Рисунок 9, б, д), вероятно, из-за влияния давления плазмы на собственную частоту полоидальных альфвеновских волн. Высокое давление плазмы увеличивает частоту полоидальных волн, которая превосходит частоту тороидальных, а низкое давление плазмы оставляет частоту полоидальных волн ниже, чем тороидальных [Klimushkin et al., 2004]. Главной особенностью распределения $\langle f_{\text{wave}} \rangle$ полоидальных волн является её уменьшение от полуночного к полуденному сектору, которое может быть связано с асимметрией распределения давления [Antonova et al., 2014]. Пространственное распределение $\langle f_{\text{wave}} \rangle$ компрессионных волн в спокойных геомагнитных условиях выглядит хаотичным из-за малого числа событий (Рисунок 9, е), а в возмущённых условиях (Рисунок 9, в) имеются две явно разделяемые области: низкочастотные волны на $\text{MLT} = 05\text{--}12$ ч и высокочастотные волны на $\text{MLT} = 18\text{--}05$ ч. Первые соответствуют прямому воздействию из солнечного ветра, а вторые — буревым пульсациям.

В Разделе 5.6 показаны распределения частоты появления волн относительно положения плазмопаузы L_{PP} . В спокойное время плазмосфера расширяется в среднем на $1\text{--}1,5 R_E$ по сравнению с возмущённым периодом. Замечено, что при этом области наибольшей частоты появления тороидальных и полоидальных волн в вечернем и предполуночном секторах сохраняют зазор в $1\text{--}2 R_E$ от положения плазмопаузы (Рисунок 10, а–г). Разделение на волны, наблюдаемые в возмущённых и спокойных геомагнитных условиях, а также построение распределений по MLT , позволяет сделать более точные выводы о наблюдаемых особенностях. В частности, распределение волн в дневном секторе приближается к плазмопаузе в спокойных условиях (Рисунок 10), что с учётом расширения самой плазмопаузы говорит о независимости волн от её положения и подтверждает вывод о внешнем источнике возбуждения этих волн, высказанный ранее в этой главе. На основе этих наблюдений сделан вывод о том, что плазмопауза выступает внутренней границей для пространственного распределения УНЧ-волн, генерируемых внутренними неустойчивостями в основном в вечернем и ночном секторах.

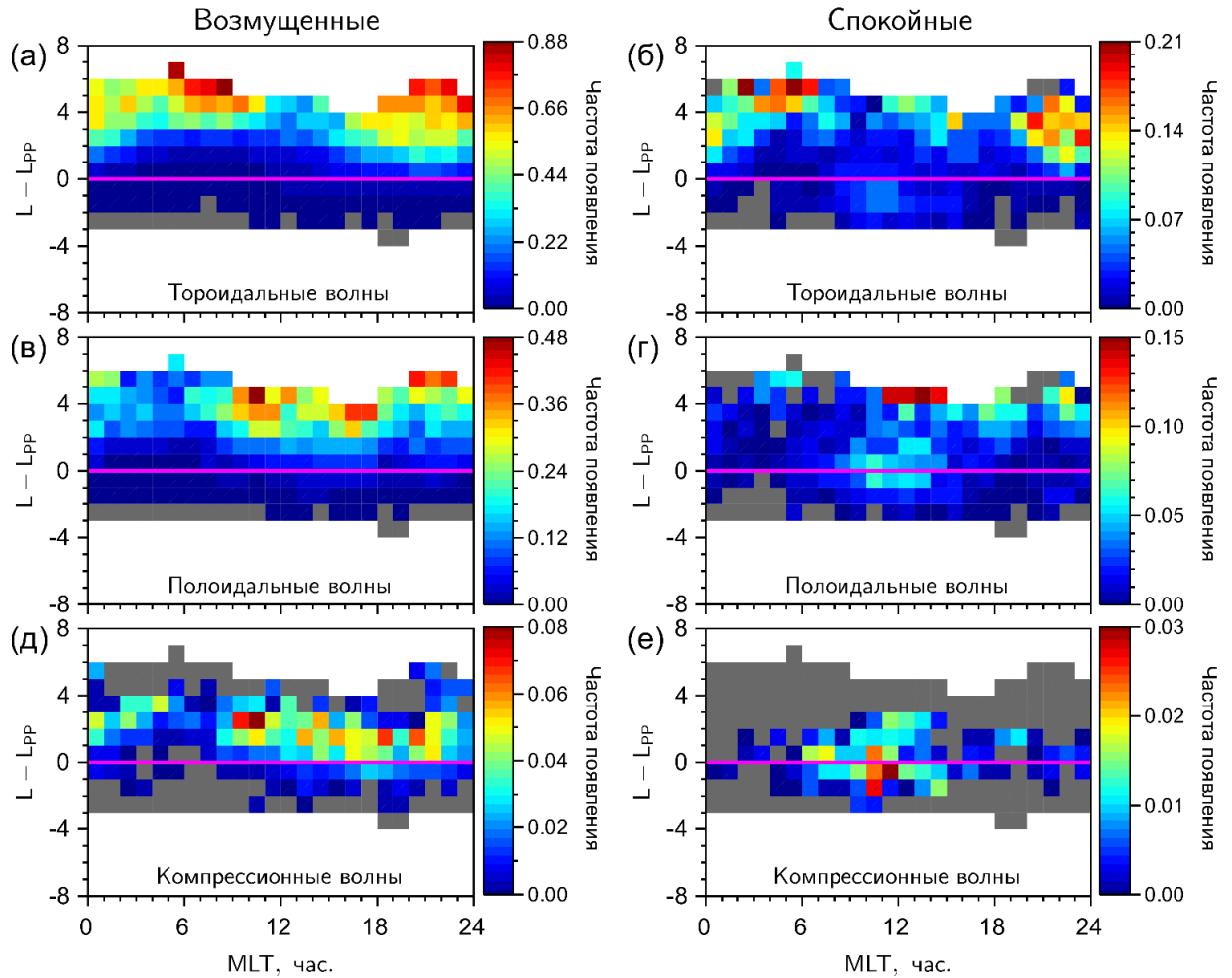


Рисунок 10. Распределение частоты появления тороидальных (*а, б*), полоидальных (*в, г*) и компрессионных (*д, е*) волн в возмущённых (*а, в, д*) и спокойных (*б, г, е*) геомагнитных условиях относительно положения плазмопаузы, полученного по данным модели NSW-GDP.

В **З**аключении сформулированы основные результаты работы.

1. В результате анализа трёх отдельных случаев наблюдения УНЧ-волн показано, что основным механизмом генерации и в дневном, и в вечернем секторах магнитосферы является градиентная неустойчивость функции распределения протонов. В первом случае в спокойных геомагнитных условиях возбуждалась долгоживущая волна на всей дневной стороне. Она оказалась второй гармоникой полоидальной альфвеновской волны, а частицы, инжектированные суббурей вскоре после первого наблюдения волны, никак не повлияли на её параметры. Анализ второго и третьего случаев показал, что градиентной неустойчивостью могут возбуждаться не только альфвеновские волны, но и компрессионные. Причём последние взаимодействуют через дрейфовый резонанс с протонами с

энергией 20–30 кэВ, тогда как в первом случае был зафиксирован баунс-дрейфовый резонанс с частицами ~100 кэВ.

2. Два случая наблюдения компрессионных волн стали прямым подтверждением возбуждения дрейфово-компрессионных волн в магнитосфере, и в отличие от предыдущих наблюдений на наземных радарх позволили в деталях изучить взаимодействие волны с заряженными частицами благодаря измерениям *in situ*. Были подтверждены характерные признаки дрейфово-компрессионной волны, отличающие её от альфвеновской волны: зависимость частоты волны от азимутального волнового числа и генерация при положительном радиальном градиенте температуры. В исследовании дрейфово-компрессионной волны 19 ноября 2018 г. наглядно показано, что наблюдаемая компрессионная волна не может быть объяснена другой популярной интерпретацией — дрейфово-зеркальной волной. Кроме того, существующая теория позволила провести оценку собственной частоты дрейфово-компрессионной волны с высокой точностью, что не выполнялось ранее, а полученные значения оказались близки к наблюдаемым;

3. С использованием процедуры автоматизированного отбора УНЧ-волн составлен набор данных из 12 977 волновых событий, наблюдавшихся с марта 2017 по декабрь 2020 г. спутником Arase. Определены характеристики волн: частота, средняя амплитуда колебаний в каждой компоненте магнитного поля и продолжительность наблюдения. Волны разделялись в соответствии с направлением колебаний магнитного поля с наибольшей средней амплитудой на три вида: полоидальные, тороидальные и компрессионные. Было показано, что компрессионные волны наблюдаются только вблизи экватора и разделяются строго на две популяции: генерируемые на дневной стороне прямым воздействием из солнечного ветра и на вечерней и ночной стороне во время магнитных бурь и суббурь. Анализ распределения средней частоты волны показал, что в отличие от полоидальных тороидальные волны обладают признаком альфвеновского резонанса — ростом частоты при приближении к Земле. Однако первые имеют зависимость частоты от MLT — она убывает от полуночи к полудню.

4. Несмотря на различия в пространственном распределении волн разных видов, связанные с тем, что определённые источники энергии для волн и механизмы генерации приводят к возбуждению УНЧ-волн конкретного вида, анализ поляризации волн из полученного набора данных не выявил наличия отдельных кластеров волн. В среднем волны имеют смешанную поперечную поляризацию, у которой средняя амплитуда колебаний

магнитного поля в азимутальном и радиальном направлениях равны. Предложена гипотеза о том, что такой результат может получиться вследствие процессов изменения поляризации альфвеновской волны во времени и/или пространстве, которые раньше оставались за пределами внимания большинства исследователей, и особенностей продольной структуры поперечных волн, которые вблизи магнитного экватора могут быть ошибочно идентифицированы как компрессионные. Разделение набора данных по азимутальным секторам показало, что на дневной стороне генерируется больше полоидальных волн, на ночной стороне — больше тороидальных. Этот результат вступает в противоречие с устоявшимся представлением о том, что тороидальные волны генерируются источниками из солнечного ветра, а полоидальные — внутренними неустойчивостями.

5. Получены распределения всех трёх видов УНЧ-волн в диапазонах Pc4 и Pc5 при разных уровнях геомагнитной активности. Обнаружено, что частота появления волн в возмущённое время гораздо выше, чем в спокойное по всей магнитосфере, но отдельные области в вечернем и ночном секторах оказываются более чувствительными к наличию возмущений, выявляя присутствие буревых волн.

6. Обнаружено, что максимум частоты появления волн отстоит от положения плазмопаузы на $1-2 R_E$ при любых геомагнитных условиях, а на самой плазмопаузе нет никакого локального максимума, который соответствовал бы активной генерации альфвеновских волн резонатором, как предполагалось в теории. Это указывает на недооцененную роль локализованных усилений потоков тяжелых ионов, таких как кислородный тор, которые могут привести к сдвигу реальной плазмопаузы от её положения, определяемого по электронной концентрации, а также на необходимость определения степени влияния плазмосферного плюма на распределение УНЧ-волн.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Rubtsov A.V.**, Agapitov O.V., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Mager O.V., Mozer F.S., Angelopoulos V. Drift resonance of compressional ULF waves and substorm-injected protons from multipoint THEMIS measurements // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018. V. 123. P. 9406–9419. DOI: 10.1029/2018JA025985.

2. **Rubtsov A.V.**, Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Ballooning instability of azimuthally small scale coupled Alfvén and slow magnetoacoustic modes in two-dimensionally inhomogeneous magnetospheric plasma // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25. 102903. DOI: 10.1063/1.5051474.

3. **Rubtsov A.V.**, Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Ballooning instability in the magnetospheric plasma: Two-dimensional eigenmode analysis // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020. V. 125. e2019JA027024. DOI: 10.1029/2019JA027024.

4. **Rubtsov A.V.**, Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Ren J., Zong Q.-G. Multispacecraft observation of the presubstorm long-lasting poloidal ULF wave // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. e2021GL096182. DOI: 10.1029/2021GL096182.

5. Zhao X.X., Zong Q.-G., Liu J.J., Yue C., Zhou X.-Z., Hao Y.X., Chen X.R., Klimushkin D.Yu., **Rubtsov A.V.**, Blake J.B., Claudepierre S.G., Reeves G.D. Normal- and reversed-boomerang stripes on electron pitch angle distributions: Solar wind dynamic pressure effect // *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49. e2021GL096526. DOI: 10.1029/2021GL096526.

6. Chelpanov M.A., Anfinogentov S.A., Kostarev D.V., Mikhailova O.S., **Rubtsov A.V.**, Fedenev V.V., Chelpanov A.A. Review and comparison of MHD wave characteristics at the Sun and in Earth's magnetosphere // *Sol.-Terr. Phys.* 2022. V. 8, I. 4. P. 3–27. DOI: 10.12737/stp-84202201.

7. **Rubtsov A.V.**, Nosé M., Matsuoka A., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Shinohara I., Miyoshi Y. Alfvén velocity sudden increase as an indicator of the plasmopause // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2023. V. 245. 106040. DOI: 10.1016/j.jastp.2023.106040.

8. **Rubtsov A.V.**, Nosé M., Matsuoka A., Shinohara I., Miyoshi Y. Polarization and spatial distribution features of Pc4 and Pc5 waves in the magnetosphere // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2023. Vol. 128. e2023JA031674. DOI: 10.1029/2023JA031674.

9. **Rubtsov A.V.**, Nosé M., Matsuoka A., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Shinohara I., Miyoshi Y. Plasmasphere control of ULF waves distribution at different geomagnetic conditions // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2023. Vol. 128. e2023JA031675. DOI: 10.1029/2023JA031675.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Гульельми А.В., Потапов А.С. Частотно-модулированные ультранизкочастотные волны в околоземном космическом пространстве // *УФН.* 2021. Т. 191, № 5. С. 475–491.

Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: "Наука", 1973. 208 с.

Климушкин Д.Ю., Магер П.Н., Челпанов М.А., Костарев Д.В. Взаимодействие длиннопериодных УНЧ-волн и заряженных частиц в магнитосфере: теория и наблюдения (Обзор) // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 4. С. 35–69.

Крылов А.Л., Лифшиц А.Е., Федоров Е.Н. О резонансных свойствах магнитосферы // Физика Земли. 1981. № 6. С. 49–58.

Мишин В.В., Клибанова Ю.Ю., Цэгмэд Б. Влияние наклона фронта неоднородности солнечного ветра на свойства вызванных им длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Космические исследования. 2013. Т. 51, № 2. С. 107–118.

Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 3. С. 72–110.

Alfvén H. Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves // Nature. 1942. Vol. 150. P. 405–406.

Angelopoulos V. The THEMIS mission // Space Sci. Rev. 2008. Vol. 141. P. 5–34.

Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V. Plasma pressure distribution in the surrounding the Earth plasma ring and its role in the magnetospheric dynamics // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2014. Vol. 115. P. 32–40.

Baker D.N. Solar wind-magnetosphere drivers of space weather // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. Vol. 58, No. 14. P. 1509–1526.

Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/Whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 1097–1108.

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

Foster G. Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series // Astron. J. 1996. Vol. 112, No. 4. P. 1709–1729.

Glassmeier K.H. ULF pulsations // In: Handbook of Atmospheric Electrodynamics: Volume II / Ed. by Volland H. Boca Raton: CRC Press, 1995. P. 463–502.

He F., Zhang X.X., Lin R.L., et al. A new solar wind-driven global dynamic plasmapause model: 2. Model and validation // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. Vol. 122. P. 7172–7187.

Jacobs J.A., Kato Y., Matsushita S., Troitskaya V.A. Classification of geomagnetic micro-pulsations // J. Geophys. Res. 1964. Vol. 69, No. 1. P. 180–181.

Klimushkin D.Y., Mager P.N., Glassmeier K.H. Toroidal and poloidal Alfvén waves with arbitrary azimuthal wave numbers in a finite pressure plasma in the Earth's magnetosphere // *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 267–287.

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

Klimushkin D.Y. The propagation of high-m Alfvén waves in the Earth's magnetosphere and their interaction with high-energy particles // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 23303–23310.

Leonovich A.S., Mazur V.A. A theory of transverse small-scale standing Alfvén waves in an axially symmetric magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1993. Vol. 41, No. 9. P. 697–717.

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

Mager P.N., Klimushkin D.Y. The field line resonance in the three-dimensionally inhomogeneous magnetosphere: Principal features // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021. Vol. 126, No. 1. e2020JA028455.

Mauk B.H., Fox N.J., Kanekal S.G., et al. Science objectives and rationale for the radiation belt storm probes mission // *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 179. P. 3–27.

McPherron R.L. Magnetic pulsations: Their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity // *Surv. Geophys.* 2005. Vol. 26. P. 545–592.

Miyoshi Y., Shinohara I., Takashima T., et al. Geospace exploration project ERG // *Earth Planets Space.* 2018. Vol. 70. 101.

Southwood D.J. A general approach to low-frequency instability in the ring current plasma // *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81. P. 3340–3348.

Zhang X.X., He F., Lin R.L., et al. A new solar wind-driven global dynamic plasmapause model: 1. Database and statistics // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 7153–7171.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ № ____ от ____ 2023 г.

Объем 26 с. Тираж ____ экз.