

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

На правах рукописи  
УДК 533.951.3

*Климушкин*

**Климушкин Дмитрий Юрьевич**

**Пространственная структура и механизмы генерации азимутально-  
мелкомасштабных ультранизкочастотных волн в космической плазме**

Специальность 1.3.1 — физика космоса, астрономия

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Иркутск — 2024

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

**Официальные оппоненты:**

**Федоров Евгений Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта» Российской академии наук, г. Москва, главный научный сотрудник.

**Ширапов Дашадондок Шагдарович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», факультет компьютерных наук и технологий, г. Улан-Удэ, профессор кафедры Вычислительные и радиоэлектронные системы.

**Демехов Андрей Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, главный научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

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

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

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

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Ясюкевич Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одним из основных элементов околоземного космоса являются ультранизкочастотные (УНЧ) волны, или геомагнитные пульсации — открытые еще в XIX веке колебания магнитного поля Земли с периодами от нескольких секунд до десятков минут [Alperovich and Fedorov, 2007; Леонович и Мазур, 2016].

УНЧ-волны генерируются посредством разнообразных механизмов — как внешних (по отношению к магнитосфере), так и внутренних. Внешние механизмы относятся в основном к азимутально-крупномасштабным волнам, имеющим малое значение азимутального волнового числа ( $m \sim 1$ ). Эти механизмы так или иначе связаны с взаимодействием магнитосферы с солнечным ветром. Это импульсы динамического давления солнечного ветра [Atkinson and Watanabe, 1966; Мишин и др., 2013] и гидромагнитные неустойчивости на границе магнитосферы, такие, как неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [Wilson and Sugiura, 1961; Mishin, 1993; Мазур и Чуйко, 2011], Крусскала–Шварцшильда [Plaschke and Glassmeier, 2011] и Рэлея–Тейлора [Гульельми и др., 2010]. Для волн с периодами в несколько десятков секунд предполагается также большая роль некоторых кинетических неустойчивостей, в частности, неустойчивости отраженных протонов перед фронтом околоземной ударной волны [Потапов, 1974; Гульельми, 1984]. Возможен также непосредственный переход в магнитосферу волн из солнечного ветра [Козырева и Клейменова, 2007; Мазур, 2010; Potapov, 2013].

Внутримагнитосферные механизмы генерации УНЧ-волн относятся к азимутально-мелкомасштабным волнам, то есть волнам с большими значениями азимутального волнового числа ( $m \gg 1$ ). Эти механизмы включают в себя различные плазменные неустойчивости, связанные с передачей волнам энергии дрейфующих в магнитосфере высокоэнергичных частиц с немаксвелловскими функциями распределения [Hasegawa, 1969; Михайловский и Похотелов, 1975]. Эти неустойчивости могут быть обусловлены сильными пространственными градиентами функции распределения [Rubtsov et al., 2021; Mager, 2021], наличием пучков частиц с инверсным характером функции распределения [Hughes et al., 1978; Mager et al., 2018], а также анизотропией тензора давления [Cooper et al., 2021]. К числу внутренних источников относятся также переменные токи, связанные с движением неоднородностей кольцевого тока или облаков частиц, инжектированными в магнитосферу во время суббурь [Золотухина, 1974]. К этой группе источников естественно отнести также токи внутри ионосферы [Leonovich and Mazur, 1993].

УНЧ-волны принимают непосредственное участие во многих магнитосферных процессах. Так, они являются одним из основных каналов магнитосферно-ионосферного взаимодействия, меняя проводимость ионосферы полярных регионов посредством модуляции потоков высыпающихся частиц [Ляцкий и Мальцев, 1983; Hiraki and Watanabe, 2011; Pilipenko et al., 2014].

Кроме того, они могут генерировать параллельные электрические поля, играющие большую роль в ускорении электронов, вызывающих полярные сияния. Предполагается важная роль УНЧ-волн в квазивязкой передаче энергии и импульса магнитосфере от солнечного ветра [Леонович и Мишин, 1999; Leonovich et al., 2003; Faganello and Califano, 2017]. Связанные с УНЧ-волнами неустойчивости могут играть значительная роль в инициации суббурь [Samson et al., 1992; Antonova et al., 2009; Rae et al., 2014; Головчанская и др., 2018].

Имеется ряд экспериментальных данных и теоретических указаний, что УНЧ-волны играют значительную роль в ускорении заряженных частиц полярного ветра, кольцевого тока и радиационных поясов [Ковтюх, 1998; Guglielmi and Lundin, 2001; Mathie and Mann, 2001; Потапов и др., 2012; Гульельми, Фейгин, 2018; Кропоткин, 2021]. Некоторые из электронов радиационных поясов имеют релятивистские энергии (порядка нескольких десятков МэВ) и потому могут причинять значительный вред аппаратуре, установленной на космических аппаратах. По этой причине знание ускорительных механизмов в магнитосфере, в частности роли УНЧ-волн, имеет большое значение для прогнозов космической погоды.

С другой стороны, роль УНЧ-волн в теории земной магнитосферы аналогична роли сейсмических волн в теории внутреннего строения Земли: они позволяют исследовать удаленные области пространства, недоступные непосредственным измерениям [Гульельми и Троицкая, 1973]. В частности, частоты наблюдаемых УНЧ-волн отражают распределение плотности плазмы вдоль силовых линий [Denton et al., 2006; Menk and Waters, 2013] и плазменного давления поперек магнитных оболочек [Vetoulis and Chen, 1994]. Без знания этих параметров составление надежных прогнозов космической погоды не представляется возможным.

Помимо земной магнитосферы, УНЧ-волны были зарегистрированы и в магнитосферах ряда других планет солнечной системы [Glassmeier and Espley, 2006]. Волны той же природы зафиксированы в солнечной короне [Mathioudakis et al., 2013]. Аналогия между процессами распространения и генерации волн в земной атмосфере и солнечной короне позволяет прояснить ряд аспектов физики солнечной атмосферы [Nakariakov et al., 2016].

Таким образом, УНЧ-волны следует признать важным и универсальным феноменом космической плазмы. Для понимания их природы и роли в активных процессах в земной магнитосфере необходимо развитие теории УНЧ-волн. Исследование активной роли УНЧ-волн в космической плазме требует знания их пространственной структуры, эволюции со временем, механизмов генерации. Рассмотрение этих вопросов является одной из актуальных проблем современной физики околоземного космического пространства.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью настоящей диссертационной работы является комплексное теоретическое исследование ультранизкочастотных волн в аксиально-

симметричной модели магнитосферы в рамках как магнитогидродинамического, так и кинетического подхода. При этом учитывается конечное давление плазмы, ее анизотропия, сложное движение частиц. Конкретно были поставлены следующие задачи:

1. Теоретически исследовать пространственно-временную структуру альфвеновских волн с учетом неустойчивости за счет взаимодействия «волна-частица» при учете кривизны силовых линий и конечного давления плазмы. При этом волны считаются генерированными как монохроматическим, так и импульсным источниками.

2. Определить полную пространственную структуру волнового поля стоячих азимутально-мелкомасштабных альфвеновских колебаний, генерированных нестационарными источниками разного типа: источником конечной длительности, широко распределенным по радиальной координате, внезапным импульсом, локализованным на отдельной магнитной оболочке, и источником, движущимся по азимутальной координате.

3. Изучить влияние на пространственную структуру стоячих медленных магнитозвуковых волн сцепления с альфвеновской модой в модели плазмы, учитывающей кривизну силовых линий и неоднородность плазмы. Применить полученные результаты для изучения устойчивости корональных арок на Солнце относительно гофрированных колебаний.

4. Изучить сцепление альфвеновских и быстрых магнитозвуковых волн в магнитосфере, обогащенной тяжелыми ионами. Применить полученные результаты к магнитосфере Меркурия, плазма которой обогащена ионами натрия, выбиваемыми с поверхности планеты солнечным излучением. Выяснить природу резонансных колебаний в магнитосфере Меркурия.

5. Изучить сцепление альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод в рамках гирокинетики в цилиндрической модели магнитосферы. Исследовать неустойчивости сцепленных мод за счет взаимодействия волна-частица, рассмотреть пространственную структуру этих мод. Изучить условия кинетического аналога баллонной неустойчивости, возникающей при сцеплении альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод. Наблюдательными проявлениями в земной магнитосфере дрейфово-компрессионных мод могут являться буревые компрессионные волны типа Pc5, регулярно наблюдаемые с помощью спутников и радаров.

6. Изучить сцепление альфвеновских и зеркально-дрейфовых мод в рамках гирокинетики, возникающих в бесстолкновительной плазме при учете анизотропии тензора давления в одномерно-неоднородной модели магнитосферы. Исследовать условия плазменных неустойчивостей, имеющих место при сцеплении этих мод. Наблюдательными проявлениями зеркально-дрейфовых мод могут являться как штормовые компрессионные волны типа Pc5 в магнитосфере Земли, так и некоторые разновидности волн в переходном слое.

7. Изучить возможность существования в магнитосфере резонаторов для компрессионных мод кинетической природы (дрейфово-компрессионных и зеркально-дрейфовых мод). В таких резонаторах волновая энергия распространяется только вдоль азимута, будучи замкнутой поперек магнитных обо-

лочек и вдоль силовых линий.

## Научная новизна

В каждой части представленного в настоящей работе исследования имеется ряд новых результатов.

При изучении кинетических неустойчивостей, генерирующих азимутально-мелкомасштабные альфвеновские волны, структура возникающей волны обычно оставалась без внимания. Наоборот, при изучении структуры волнового поля обычно не учитываются неустойчивости. В нашей работе обе проблемы рассмотрены единым образом: изучена структура волнового поля альфвеновских колебаний, генерированных неустойчивостью. Вывод оказался достаточно парадоксальным: из-за трансформации волны из полоидальной в тороидальную наиболее усиленными оказываются не полоидальные, а тороидальные альфвеновские колебания (хотя инкремент неустойчивости максимален именно для полоидальных колебаний). Как известно из более ранних исследований, эта трансформация может быть обусловлена двумя факторами: поляризационным расщеплением спектра из-за кривизны силовых линий (для монохроматических волн) и разбеганием начального возмущения по фазам (для импульсно-генерированных волн). С другой стороны, большая роль кинетических неустойчивостей в генерации полоидальных колебаний, по всей видимости, подтверждается экспериментом. Это позволяет сделать важный вывод, что основная часть наблюдаемых полоидальных колебаний являются модами поперечного альфвеновского резонатора, возникновение которого связано с кривизной силовых линий и конечным плазменным давлением. Для резонаторных мод трансформация из полоидальной в тороидальную моду не должна иметь место.

Впервые изучено становление пространственной структуры полоидальных альфвеновских волн, когда одновременно имеют место разные виды трансформации из полоидальной в тороидальную моду, обусловленные различными факторами: поляризационным расщеплением спектра и разбеганием по фазам. Для этого рассмотрен источник альфвеновской волны в виде квазимонохроматического волнового пакета конечной длительности, учтена кривизна силовых линий магнитного поля. До сих пор источник такого типа рассматривался только для тороидальных альфвеновских волн и плоской геометрии магнитного поля, когда связанная с поляризационным расщеплением спектра трансформация альфвеновских волн не имеет место.

Впервые изучена пространственно-временная структура альфвеновских волн, генерированных импульсом поверхностного тока на границе магнитосферы, аналогичным тому, который возникает при резком сжатии магнитосферы импульсом давления солнечного ветра.

При изучении медленных магнитзвуковых волн (ММЗ) в магнитосфере основной упор обычно делался на их структуру вдоль силовых линий. Поперечная структура ММЗ была исследована только в рамках простейших (одномерно-неоднородных моделей) среды. В данной работе была исследована структура в рамках более реалистичных моделей, учитывающих кривизну

силовых линий. Поперечная дисперсия ММЗ в этом случае вызвана сцеплением с альфвеновской модой. Результаты этого исследования были приложены для анализа неустойчивости сцепленных мод в плазме конечного давления. В качестве примера была избрана гофрировочная неустойчивость корональных арок на Солнце, поскольку для ее изучения можно ограничиться простой моделью с постоянной кривизной силовых линий. Были получены условия неустойчивости, рассмотрена структура неустойчивых мод поперек магнитных оболочек. Кроме того, было впервые изучено сцепление альфвеновской и быстрой магнитозвуковой мод (БМЗ) в плазме магнитосферы Меркурия, обусловленное наличием в ней тяжелых ионов (в основном, ионов натрия). Впервые получено резонансное условие для меркурианской магнитосферы, аналогичное условию альфвеновского резонанса в земной магнитосфере.

Систематического изучения влияния сцепления альфвеновской и дрейфово-компрессионных мод на их пространственную структуру и условия неустойчивости до сих пор не производилось. В работе показано, что одним из следствий такого сцепления является кинетический аналог баллонной неустойчивости. Определены условия развития этой неустойчивости, показаны ее отличия от гидродинамической баллонной неустойчивости. Кроме того, сцепление альфвеновских и зеркально-дрейфовых мод до сих пор изучалось только на конкретных примерах. В работе показано, что следствием этого сцепления является возникновение новых мод колебаний, частота которых имеет реальную и мнимую части, и которые при определенных условиях могут раскачиваться из-за неустойчивости.

Еще одним важным следствием сцепления альфвеновской моды с компрессионной в неоднородной плазме, не изученным ранее, является появление параллельного электрического поля, значительно более сильного, чем в однородной плазме. Обычно появление у альфвеновской волны параллельного электрического поля изучается посредством уравнения квазинейтральности плазмы, в котором есть два слагаемых: одно связано с поперечным электрическим полем волны, имеющим вихревую природу, и второе — с электростатическим, потенциальным полем. Первое слагаемое естественно ассоциируется с альфвеновской волной, второе приводит к появлению параллельного электрического поля. В нашем подходе в уравнении квазинейтральности появляется еще одно, третье слагаемое, отвечающее за продольное магнитное поле волны. Это слагаемое обусловлено сцеплением альфвеновской моды с компрессионной.

В работе предложена новая концепция резонаторов поперек силовых линий для компрессионных мод кинетической природы (дрейфово-компрессионных и зеркально-дрейфовых мод). До сих пор изучались только резонаторы для ультранизкочастотных мод других типов: быстрой магнитозвуковой и альфвеновских мод. Однако резонаторы для кинетических компрессионных мод могут иметь очень большое значение, поскольку с такими модами может ассоциироваться важная разновидность УНЧ-волн в магнитосфере: буревые компрессионные пульсации типа Pc5, которые могут отвечать на ускорение частиц радиационных поясов и некоторые виды авроральных

явлений.

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

Научная ценность диссертации определяется тем, что в ней в рамках МГД и кинетического приближения построена теория УНЧ-волн в моделях магнитосферы с учетом таких факторов, как конечное давление неоднородной плазмы, кривизна силовых линий и взаимодействие волн и частиц. В рамках этой модели исследованы моды УНЧ-колебаний, которые могут вносить значительный вклад в общее волновое поле магнитосферы: альфвеновские волны, быстрый и медленный магнитный звук, дрейфово-компрессионные и зеркально-дрейфовые моды. Данная работа может стать основой для развития теории УНЧ-волн в еще более сложных и более реалистичных моделях магнитосферы.

Практическое значение работы заключается в том, что полученные в ней результаты могут быть использованы в целях прогноза космической погоды. Так, УНЧ-волны разных типов могут ускорять частицы космической плазмы до высоких (вплоть до релятивистских) энергий, которые могут представлять опасность для космических аппаратов. Кроме того, сами УНЧ-волны могут служить индикаторами активных процессов в магнитосфере Земли. Тем самым, они представляют большой интерес с точки зрения разработки методов диагностики околоземного космоса.

Поскольку физическая постановка задачи при изучении волновых процессов во внешних слоях солнечной атмосферы очень близка к постановке задачи при исследовании УНЧ-колебаний земной магнитосферы, некоторые результаты диссертационной работы, помимо геофизических приложений, могут быть использованы и в физике Солнца.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обусловлена использованием хорошо разработанных математических методов. Результаты работы согласуются с предыдущими исследованиями, а в предельных случаях сводятся к известным классическим выражениям. Разработанные в работе теоретические представления в основных чертах соответствуют данным экспериментов. Все представленные в диссертации результаты опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах.

### **Личный вклад автора**

Постановка задачи во всех работах, на основании которых написана диссертация, принадлежит автору. Автору принадлежит решающая роль в математической разработке соответствующих теорий и интерпретации полученных результатов. Все статьи, на которых основана диссертационная работа, были написаны лично автором, даже если он и не являлся первым соавтором.



## **Апробация работы**

Основные результаты диссертации представлялись на семинарах ИСЗФ СО РАН и ИФЗ РАН, а также на ряде российских и международных научных конференций, а том числе:

- Международный семинар «Низкочастотные волновые процессы в космической плазме», Звенигород, 2007;
- Школа-конференция «Проблемы геокосмоса», Санкт-Петербург, 2004, 2016, 2021 гг.;
- Всероссийская конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, 2016 и 2020 гг.;
- Международный семинар «50 лет теории резонансного сцепления мод», Япония, Фукуока, 2011 г.;
- Международная конференция «Динамические процессы в космической и астрофизической плазмах», Израиль, Иерусалим, 2012 г.;
- Международные конференции по суббурям: Германия, Люнебург, 2012 г.; Тромсё, Норвегия, 2019 г.;
- Международная конференция «Жизнь со звездой», Иркутск, 2013 г.;
- Международная конференция «Магнитосферные взаимодействия на дневной стороне», Китай, Ченду, 2017 г.;
- Международная конференция «Низкочастотные волны в космической плазме», Корея, Чеджу, 2014 г.;
- Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза, Австрия, Вена, 2018 г.;
- Объединенная научная ассамблея Международной ассоциации по геомагнетизму и аэрономии и Международной ассоциации сейсмологии, Индия, 2021 г.
- Международная конференция «Достижения в понимании альфвеновских волн в гелиосфере», Германия, Берлин, 2023 г.

и ряде других.

Непосредственно теме диссертации соответствует более 70 работ, опубликованных при участии автора в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах.

## **Соответствие паспорту специальности**

Задачи диссертационной работы и полученные результаты соответствуют областям исследований специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия (физико-математические науки) в части пунктов 10, 11, 12, 13.

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

1. Определена пространственная структура и эволюция во времени альфвеновских волн, генерированных плазменными неустойчивостями при

взаимодействии волна-частица, с учетом нестационарности источника, конечного давления плазмы, кривизны силовых линий.

2. Установлена пространственно-временная структура поля альфвеновских колебаний, генерированных нестационарными источниками различного типа: квазимонохроматический волновой пакет конечной длительности, импульс поверхностного тока на магнитопаузе, движущаяся неоднородность кольцевого тока.

3. Выявлена пространственная структура сцепленных альфвеновских и компрессионных (быстрых и медленных магнитозвуковых) волн в рамках магнитной гидродинамики в реалистичных моделях магнитного поля. Применение построенной теории к анализу волнового поля в магнитосфере Меркурия и корональных арок в солнечной атмосфере.

4. Определены пространственные структуры и условия неустойчивости сцепленных альфвеновских и компрессионных (зеркально-дрейфовых и дрейфово-компрессионных) волн в рамках кинетического подхода с учетом поперечной неоднородности плазмы, кривизны силовых линий и взаимодействия волна-частица.

5. Обоснована возможность существования в космической плазме резонаторов поперек силовых линий для зеркально-дрейфовых и дрейфово-компрессионных мод, где поперечная дисперсия обусловлена сцеплением с альфвеновской модой или конечным ларморовским радиусом.

## **Публикации**

Материалы, используемые в диссертации, опубликованы в 20 печатных работах в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, и приравненных к журналам категорий K1 и K2 перечня ВАК.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 257 страниц, включая 60 рисунков. Список литературы содержит 316 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит основные сведения об УНЧ-волнах (геомагнитных пульсациях). Кратко говорится о модах гидромагнитных (МГД) колебаний, их отличительных особенностях, классификации наблюдаемых УНЧ-волн в магнитосфере: тороидальные, полоидальные, компрессионные волны (рис. 1).

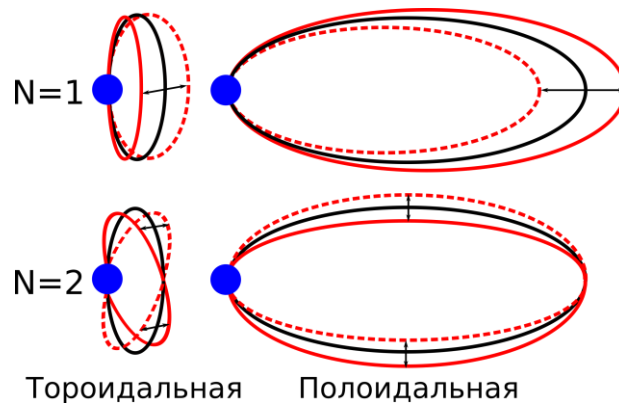


Рисунок 1. Колебания силовых линий в тороидальных и полоидальных альфвеновских волнах.

Подчеркивается важность разделения волн на азимутально-крупномасштабные (азимутальное волновое число  $m \sim 1$ ) и азимутально-мелкомасштабные ( $m \gg 1$ ), как с точки зрения их механизмов генерации, так и с точки зрения пространственной структуры. Рассказывается о трансформации альфвеновских волн из полоидальных в тороидальные, вызванном двумя факторами: поляризационном расщеплении спектра из-за кривизны силовых линий (для монохроматических волн) и разбеганием по фазам (для импульсно-генерированных волн). Волна имеет полоидальную поляризацию на магнитной поверхности, называемой полоидальной, и тороидальную поляризацию на тороидальной поверхности. Альфвеновская волна может существовать только в узком промежутке между ними — области прозрачности [Leonovich, Mazur, 1993].

Приводится обзор разных видов азимутально-мелкомасштабных волн, механизмов их генерации. Рассказывается о различных неустойчивостях, способных генерировать разные типы волн с  $m \gg 1$ . Выделяются два основных типа таких волн. К первому относятся полоидально-поляризованные волны типа Pc4, представляющие собой главную или вторую гармонику альфвеновской волны, стоячей вдоль силовой линии между магнитосопряженными точками ионосферы. Отмечается, что такие волны могут генерироваться при резонансном взаимодействии с высокоэнергичными частицами благодаря неустойчивостям двух типов: 1) из-за инверсного распределения частиц и 2) из-за резких пространственных градиентов функции распределения. Приводится обзор экспериментальных данных, свидетельствующих в пользу каждого из этих механизмов. Второй вид азимутально-мелкомасштабных волн представлен компрессионными пульсациями типа Pc5, наблюдаемыми во время бурь и суббурь. Эти волны характеризуются значительными вариациями магнитного и плазменного давления, происходящими в противофазе (свойство диамагнитности). Предлагались различные интерпретации волн этого типа: медленный магнитный звук — МГД-мода, характерная для плазмы конечного давления; зеркально-дрейфовые и дрейфово-компрессионные моды — две моды, возникающие в неоднородной бес-

столкновительной плазме (в рамках кинетического подхода); наконец, это могут быть альфвеновские волны, которые приобретают продольное магнитное поле из-за кривизны силовых линий. В целом, природа этих волн остается неясной. Кроме того, к числу азимутально-мелкомасштабных волн могут относиться и некоторые виды пульсаций типа  $Pi2$ . В ряде недавних работ было высказано предположение, что эти волны могут отождествляться с альфвеновскими волнами в регионах магнитосферы с большими значениями плазменного давления (отношение плазменного давления к магнитному  $\beta \sim 1$ ), генерированными различными плазменными неустойчивостями, возникающими в случае, когда азимутальная длина волны намного меньше радиальной.

**Глава 1** посвящена изучению пространственной структуры и эволюции во времени альфвеновских волн, генерированных источниками различного типа.

Неоднократно высказывалось предположение (рассмотренное во Введении), что азимутально-мелкомасштабные альфвеновские волны генерируются неустойчивыми популяциями дрейфующих в магнитосфере высокоэнергичных частиц. Важным аргументом в пользу этой точки зрения считается полоидальная поляризация этих волн. Действительно, для полоидально-поляризованных альфвеновских волн характерна большая азимутальная компонента электрического поля, благодаря которой осуществляется обмен энергией между волной и дрейфующей частицей. Однако при этом не рассматривалась пространственная структура и эволюция во времени возникающих колебаний. В данной работе были рассмотрены эти вопросы для альфвеновской волны, возбужденной источниками двух типов: монохроматическим и импульсно-генерированными. Учтена кривизна силовых линий и конечное плазменное давление.



Рисунок 2. Зависимость логарифма амплитуды волны  $|E|$  от времени при разных отношениях  $\gamma/\delta$  (указано около кривых). По вертикальной оси — условные единицы (логарифмический масштаб), время  $t$  нормировано. Построение выполнено для азимутального волнового числа  $m=50$ . Вертикальная прямая разделяет области преимущественно полоидальной (слева от нее) и тороидальной поляризации волны.

В согласии с предыдущими исследованиями установлено, что инкремент неустойчивости максимален для полоидально-поляризованных волн и равен нулю для волн с тороидальной поляризацией. Зависимость инкремента  $\gamma$  от радиальной координаты  $x$  может быть выражена простой формулой

$$\gamma = \gamma_0 \frac{x_T - x}{\Delta},$$

где  $\gamma_0$  — значение инкремента на полоидальной поверхности,  $\Delta$  — ширина области прозрачности,  $x_T$  — координата тороидальной поверхности. Как видно из этой формулы, максимальное значение инкремента достигается на полоидальной поверхности  $x_p$ , в то время как на тороидальной поверхности он равен нулю.

Тем не менее, установлено, что в обоих случаях неустойчивость в конечном итоге порождает тороидальную волну (рис. 2). Это связано с трансформацией волны из полоидальной в тороидальную, вызванную в первом случае поляризационным расщеплением спектра (в конечном итоге кривизной силовых линий) и разбеганием по фазам во втором случае. Противоречие с многочисленными экспериментальными данными, говорящими в пользу генерации неустойчивостями, может разрешаться в том случае, если основная часть полоидальных волн в магнитосфере представляет собой собственные моды (или суперпозиции собственных мод) резонатора поперек магнитных оболочек, существование которого было предсказано в работах [Vetoulis and Chen, 1994; Leonovich and Mazur, 1995; Klimushkin, 1998]. В этом случае монохроматическая волна имеет почти полоидальную поляризацию во всей области прозрачности, а при импульсной генерации происходит не разбегание исходного возмущения по фазам, а амплитудная модуляция, часто наблюдаемая у полоидальных волн в магнитосфере.

Далее, рассмотрена пространственно-временная структура альфвеновских волн, генерированных импульсными источниками более сложного вида: (1) импульс конечной длительности, широко распределенный поперек L-оболочек, и (2) резкий импульс, сконцентрированный на одной L-оболочке.

Первая задача имеет большое значение для изучения установления структуры монохроматической альфвеновской волны. Установлено, что эволюция волнового поля делится на несколько фаз (рис. 3). На первой фазе (сразу после включения источника) эволюция волны определяется явлением разбегания по фазам. При этом вблизи полоидальной поверхности формируется волновой фронт, движущийся с групповой скоростью поперек магнитных оболочек по направлению к тороидальной поверхности. Наличие поперечной групповой скорости альфвеновской волны связано с поляризационным расщеплением спектра. При прохождении фронта через некоторую точку амплитуда волны резко повышается. В тех точках, куда фронт еще не дошел, продолжается эволюция волнового поля, определяемая разбеганием по фазам. После прохождения волнового фронта в данной точке формируется практически установившаяся монохроматическая волна. При выключении источника формируется новый волновой фронт, который как бы уносит с со-

бой структуру, характерную для монохроматической волны. После прохождения второго волнового фронта амплитуда волны резко уменьшается, а эволюция волнового поля снова начинает определяться разбеганием по фазам.

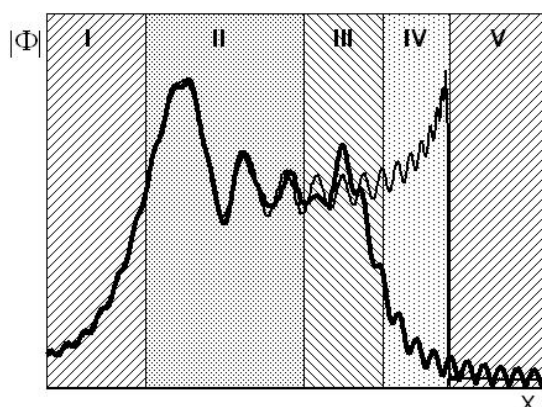


Рисунок 3. Пространственно-временная структура волны во время работы источника: I, V: Разбегание по фазам (за пределами области прозрачности); II: Практически установившаяся монохроматическая волна; III: Прохождение волнового фронта; IV: Разбегание по фазам (в областях, где еще не прошел волновой фронт).

Вторая задача имеет отношение к генерации альфвеновских волн импульсом давления солнечного ветра, который эквивалентен импульсу поверхностного тока Чепмена-Ферраро, текущего по магнитопаузе. Непосредственно после импульса в магнитном поле волны присутствуют как полоидальные, так и тороидальные компоненты. Амплитуда волны экспоненциально уменьшается с расстоянием от источника. Полоидальная составляющая колеблется в режиме биения. Из-за разбегания по фазам ее амплитуда уменьшается со временем, но растет амплитуда тороидальной компоненты. В тороидальной составляющей биение выражено менее заметно. Общая энергия, интегрированная по всему объему плазмы, сохраняется. По прошествии времени волновое поле разделяется на тонкое ядро и широкий хвост колебания: плотность энергии вблизи магнитной оболочки источника растет, в то время как вдали от источника она значительно уменьшается, наконец достигая некоторого небольшого постоянного значения. Таким образом, на поверхности источника постепенно «вызревает» волна Альфвена с частотой, равной локальной альфвеновской частоте на этой поверхности. В хвосте волнового поля каждая силовая линия колеблется с локальной альфвеновской частотой на своей магнитной оболочке.

Также изучена генерации альфвеновской волны движущимся облаком плазмы. Такие облака могут возникать при суббуревых инъекциях заряженных частиц (рис. 4). Установлено, что волна появляется в данной точке сразу после прохождения облака. Направление ее распространения по азимуту совпадает с направлением движения источника. Сразу после прохождения облака поляризация волны является полоидальной. По мере удаления источника от заданной точки волна постепенно трансформируется в тороидальную. Азимутальное волновое число  $m$  определяется из соотношения

$$m = \Omega/\omega_d,$$

где  $\omega_d$  — частота дрейфа в неоднородном магнитном поле и  $\Omega$  — собственная альфвеновская частота на данной L-оболочке, медленно меняющаяся от полоидальной до тороидальной собственной частоты (различие между которыми вызвано поляризационным расщеплением спектра). Это соотношение напоминает условие дрейфового резонанса при обмене энергии между волнами и частицами, но имеет совершенно другой физический смысл. При реалистичных предположениях о концентрации и энергии частиц амплитуды генерируемых волн близки к наблюдаемым.

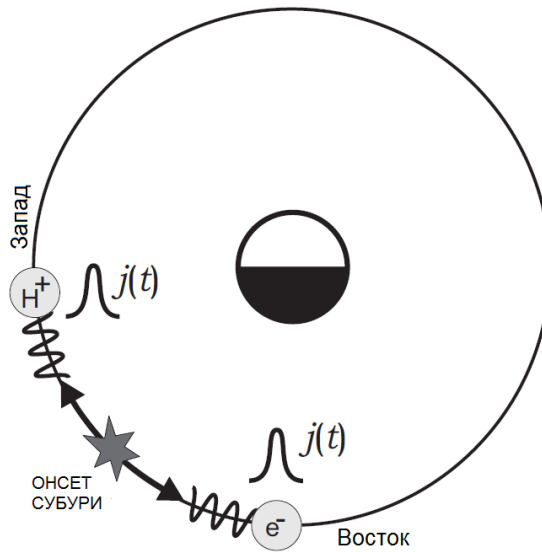


Рисунок 4. Схема генерации альфвеновской волны движущимися облаками плазмы, инжектированными во время суббури.

Возможно, предложенный механизм можно приложить к объяснению ряда наблюдательных данных о полоидальных волнах типов Pc4-5. Так, в работе [Zolotukhina et al., 2008] было изучено поведение магнитного поля во времени волны Pc5, появившейся в точке геостационарной орбиты в тот момент, когда туда прибыли частицы (протоны и электроны с разных сторон), инжектированные во время суббури. Было показано, что это поведение согласуется с теорией. В обширном статистическом исследовании [James et al., 2013] было установлено, что волна каждый раз возникала в тот момент, когда в данную точку прибывали частицы, при этом волны, наблюдаемые к западу или востоку от онсета суббури, распространялись, соответственно, на запад или восток, то есть убежали от точки онсета. Это согласуется с тем, что эти волны генерировались, соответственно, протонами или электронами, инжектированными во время суббури. В работе [Моисеев и др., 2020] по наземным наблюдениям (геомагнитным и риометрическим) обнаружено азимутальное распространение пульсаций типа P13 со скоростями, соответствующим скоростям распространения суббуревых инъекций электронов. Наконец, предложенный механизм дает естественное объяснение экваториальному распространению фазы полоидальных волн с  $m \gg 1$ , регулярно наблюдающемуся с помощью радаров: достаточно только до-

пустить, что дрейфовая скорость инжектированных частиц растет с расстоянием.

В главе 2 рассматривается сцепление альфвеновской и компрессионной мод в рамках гидродинамического описания плазмы. В качестве компрессионных мод в МГД выступают быстрый (БМЗ) и медленный (ММЗ) магнитный звук (последний может распространяться только в плазме конечного давления).

Сцепление альфвеновской моды и БМЗ — это альфвеновский резонанс, один из основных объектов изучения в физике УНЧ-волн. Это явление заключается в том, что БМЗ, генерированный при взаимодействии с солнечным ветром вблизи магнитопаузы, распространяется внутрь магнитосферы и отражается доходя до некоторой предельной магнитной оболочки; однако часть энергии БМЗ просачивается внутрь магнитосферы и доходит до резонансной поверхности, определяемой как магнитная оболочка, где частота колебаний равна собственной частоте альфвеновской волны. Вблизи резонансной поверхности возбуждается тороидально-поляризованная альфвеновская волна.

Как установили Гульельми и Потапов [1984], в рамках 1-жидкостной МГД альфвеновский резонанс не может иметь место для азимутально-симметричных колебаний ( $m=0$ ). Однако этот подход не учитывает, что в плазме могут находиться тяжелые ионы, гирочастота которых по порядку величины может быть близка к собственной частоте стоячих УНЧ-волн. Для земной магнитосферы альфвеновский резонанс имеет место для волн в диапазонах Pc3-5 и тяжелые ионы (в основном кислород) не могут оказывать существенного влияния на резонансное возбуждение стоячих альфвеновских волн. Однако в магнитосфере планеты Меркурий силовые линии очень короткие и собственные альфвеновские частоты близки к гирочастотам тяжелых ионов. В этом случае это ионы натрия, выбиваемые с поверхности планеты солнечным излучением. С другой стороны, УНЧ-волны в магнитосфере Меркурия наблюдаются с борта космических аппаратов: впервые они были обнаружены при пролете мимо Меркурия станции MARINER-10, в настоящее время их регулярно фиксируют с борта станции MESSENGER, находящейся на орбите вокруг Меркурия [Boardsen et al., 2012].

Для объяснения УНЧ-колебаний в магнитосфере Меркурия в работе изучены моды УНЧ-колебаний в неоднородной намагниченной плазме с высоким содержанием тяжелых ионов. Показано, что имеются две моды колебаний, названные направляемой и изотропной. Эти моды напоминают альфвеновскую и БМЗ-моды в земной магнитосфере, но обладают рядом отличительных особенностей. Главной из них является возможность сцепления мод даже для азимутально-симметричных возмущений ( $m=0$ ). В магнитосфере Меркурия за сцепление отвечают недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости, связанные с конечным отношением частоты колебаний к гирочастоте тяжелых ионов. В частном случае одномерно-неоднородной плазмы показано существование волнового резонанса, аналогичного альфвеновскому резонансу в одножидкостном МГД-приближении.



Сингулярные решения демонстрируют колебательное поведение вблизи особой точки. Установлено, что резонансные УНЧ-колебания в магнитосфере Меркурия должны быть отождествлены с ионно-ионной гибридной модой, впервые рассмотренной в работе [Buchsbaum, 1960].

Кроме того, в Главе 2 рассмотрена структура медленной магнитозвуковой (ММЗ) моды, сцепленной с альфвеновской модой из-за кривизны силовых линий в аксиально-симметричной магнитосфере. Это сцепление имеет большое значение для азимутально-мелкомасштабных волн ( $m \gg 1$ ). Установлено, что благодаря этому сцеплению ММЗ распространяется поперек магнитных оболочек, будучи запертым между двумя магнитными оболочками, на одной из которых имеется резонанс, на второй — отсечка. На этих поверхностях радиальная составляющая волнового вектора стремится к бесконечности и к нулю соответственно. Резонансная поверхность находится дальше от Земли, чем поверхность отсечки. Ввиду малого значения скорости звука вблизи экватора резонансная частота ММЗ намного ниже, чем у альфвеновской моды. Максимум амплитуды медленной моды, выраженный в терминах параллельного магнитного поля, сосредоточен вблизи экватора, но выраженный в гидромагнитных терминах, сосредоточен вблизи ионосферы. В земной магнитосфере ММЗ является одним из кандидатов на роль компрессионных буревых колебаний типа Pc5, хотя это отождествление не является общепринятым.

Однако ММЗ регулярно наблюдается в солнечной короне [Nakariakov et al., 2016]. В работе изучено поведение сцепленных альфвеновских и ММЗ-возмущений корональной аркады, моделируемой полуцилиндром с азимутальным магнитным полем и неоднородными радиальными профилями давления, температуры и поля плазмы. Рассмотрены возмущения с короткими продольными (в направлении вдоль аркады) длинами волн. Радиальная структура возмущений определяется радиальными профилями равновесных величин. Определены условия для гофрировочной неустойчивости корональной аркады. Для мод, симметричных относительно экватора, это условие имеет вид

$$kr\beta < -1 - \frac{32 v_C^2}{\pi^2 v_A^2},$$

где  $k$  — обратный радиальный масштаб неоднородности давления,  $r$  — радиус магнитной оболочки,  $\beta$  — отношение плазменного давления к магнитному,  $v_C$  и  $v_A$  — скорости ММЗ и альфвеновской моды, соответственно. Для антисимметричных мод условие неустойчивости выглядит гораздо проще:

$$kr\beta < -4.$$

Установлено, что инкремент неустойчивости увеличивается с уменьшением продольной длины волны и радиального волнового числа. Радиальные возмущения магнитного поля создают гофрированную рябь аркады в продольном направлении (рис. 5). Для корональных условий время роста неус-

тойчивости короче одной минуты и уменьшается с повышением температуры.

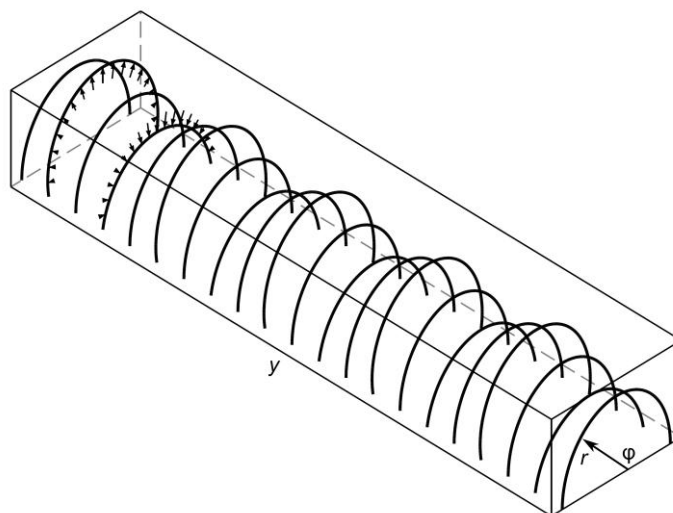


Рисунок 5. Схематическое изображение корональной арки при условии "гофрировочной" неустойчивости.

**Глава 3** посвящена исследованию сцепления между альфвеновской и компрессионной модами в рамках кинетического описания плазмы. Кинетическое описание представляется более адекватным, поскольку космическая плазма является бесстолкновительной. Оно позволяет учесть такие факторы, как дрейфовое и баунс-движение заряженных частиц в магнитосфере, взаимодействие волна-частица, анизотропию тензора давления, эффекты диамагнитного дрейфа. Следуя более ранним исследованиям, в работе предполагается, что в плазме имеется малая примесь холодных электронов, благодаря которой параллельное электрическое поле возмущения становится равным нулю. Поскольку в кинетическом описании существование ММЗ возможно только благодаря параллельному электрическому полю, эта мода в данном подходе существовать не может. Однако возникают другие ветви колебаний, также компрессионного характера — зеркально-дрейфовые и дрейфово-компрессионные моды. Неоднократно высказывалось предположение, что эти моды следует отождествить с компрессионными буревыми пульсациями  $Pc5$ . Зеркально-дрейфовые и дрейфово-компрессионные моды сцеплены с альфвеновской за счет неоднородности плазмы и магнитного поля.

В работе изучена пространственная структура сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод в цилиндрической модели магнитосферы, учитывающей кривизну линии поля и неоднородность плазмы и магнитного поля поперек магнитных оболочек, но пренебрегающей неоднородностью вдоль силовых линий. Обнаружено, что возмущение локализовано в двух областях прозрачности — альфвеновской и дрейфово-компрессионной. Обе области ограничены резонансной поверхностью и поверхностью отсечки, где радиальная компонента волнового вектора обращается в бесконечность и ноль, соответственно. Получены условия неустойчивости и выражения для инкрементов сцепленных мод за счет взаимодействия с частицами. В

альфвеновской области прозрачности неустойчивость возникает при наличии отрицательного градиента температуры плазмы. В дрейфово-компрессионной области прозрачности необходимым условием неустойчивости является рост температуры с радиальной координатой.

Изучен кинетический аналог баллонной неустойчивости для сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод с учетом эффектов конечного плазменного давления, кривизны силовых линий и диамагнитного дрейфа. Использована модель с постоянной кривизной линий магнитного поля, которая позволила получить аналитические результаты. Частоты альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод зависят от градиента давления плазмы (рис. 6). При росте тока частоты этих двух ветвей приближаются друг к другу. При некотором критическом значении тока и ветви сливаются, и развивается неустойчивость, названная дрейфово-баллонной неустойчивостью сцепления. Порог неустойчивости задается соотношением

$$k_{\parallel}^2 r^2 + kr\beta + \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{7}{2} + \frac{5\beta}{4} \right) < 0,$$

где  $k_{\parallel}$  — продольная компонента волнового вектора.

Эта неустойчивость имеет три основных отличия от обычной магнито-гидродинамической баллонной неустойчивости: (1) дрейфово-баллонная неустойчивость сцепления не является апериодической, существует действительная часть частоты колебаний порядка частоты дрейфа, (2) неустойчивыми могут быть только моды с тем же направлением азимутальной фазовой скорости, что и скорость диамагнитного дрейфа ионов, (3) порог неустойчивости зависит от частоты диамагнитного дрейфа. В настоящее время предполагается, что баллонная неустойчивость может играть большую роль в инициации магнитосферных суббурь [Rae and Watt, 2016].

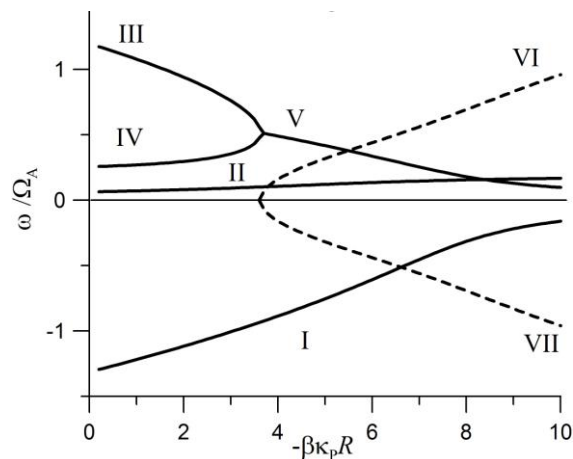


Рисунок 6. Действительная и мнимая части частоты (сплошная и пунктирная линии) сцепленных альфвеновских и дрейфово-компрессионных волн при дрейфово-баллонной неустойчивостью сцепления.

Рассмотрена устойчивость сцепленных альфвеновской и зеркально-дрейфовой мод. Введен параметр сцепления, пропорциональный квадрату

радиального градиента давления. Получено и решено дисперсионное соотношение для сцепленных мод при различных значениях параметра связи. При наличии сцепления существенно изменяется частота зеркально-дрейфовой моды, зеркальная неустойчивость может развиться при более низких значениях анизотропии плазмы. Сцепление с зеркально-дрейфовой модой также вызывает уменьшение частоты альфвеновской моды и приводит к неустойчивости, инкремент которой пропорционален параметру сцепления. При сильном сцеплении моды сливаются, поэтому понятия альфвеновской и зеркально-дрейфовой мод утрачивают свое значение. Вместо них введены другие понятия: неустойчивых и устойчивых альфвеновско-зеркальных мод, первая из которых неустойчива при любом значении анизотропии, а вторая, напротив, всегда затухает. Следствием сцепления является также поперечная дисперсия мод, то есть зависимость частоты волны от поперечной составляющей волнового вектора. Этот эффект может быть ответственен за передачу энергии поперек силовых линий.

Предложен двухэтапный механизм генерации параллельного электрического поля альфвеновской волны. На первом этапе сцепление альфвеновской волны с компрессионной модой из-за неоднородности магнитного поля и конечного давления плазмы приводит к появлению у альфвеновской волны продольного магнитного поля. На втором этапе продольное магнитное поле приводит к наличию параллельного электрического поля из-за связи электростатической модой, обусловленного условием квазинейтральности. Параллельное электрическое поле, генерированное таким механизмом, значительно больше, чем параллельное электрическое поля кинетической альфвеновской волны. Эти выводы могут иметь большое значение для физики полярных сияний, поскольку имеет место ряд экспериментальных указаний, что УНЧ-волны отвечают за ускорение авроральных электронов [Keiling, 2021], прежде всего за счет параллельного электрического поля волны.

В главе 4 рассматривается теория о резонаторах для компрессионных волнах кинетической природы — зеркально-дрейфовой и дрейфово-компрессионной мод. Представление о таких резонаторах является новым для физики магнитосферы, поскольку ранее рассматривались только резонаторы для БМЗ и кинетических альфвеновских волн [Дмитриенко и др., 1986]. Существование резонатора возможно только при наличии радиальной дисперсии, то есть зависимости частоты волны от радиальной компоненты волнового вектора. Однако у кинетических компрессионных мод частота, в первом приближении, зависит только от азимутальной компоненты волнового вектора (числа  $m$ ). Тем не менее, у этих мод радиальная дисперсия возникает при учете сцепления с альфвеновской волной из-за неоднородности плазмы, а также благодаря эффектам конечного ларморовского радиуса ионов.

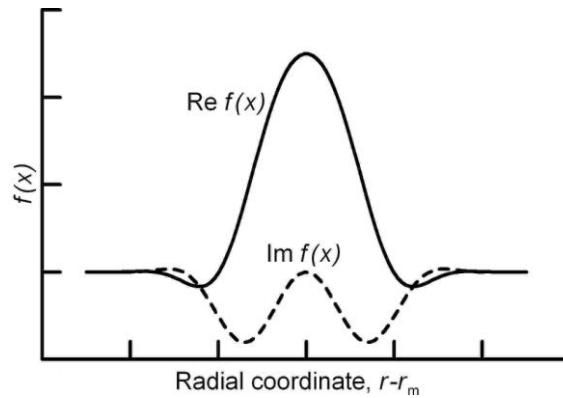


Рисунок 7. Структура зеркально-дрейфовой моды поперек магнитных оболочек.

Эти два эффекта обуславливают возможность существования резонатора для зеркально-дрейфовых мод. Получено волновое уравнение, определяющее как пространственную структуру моды, так и ее собственную частоту (действительную и мнимую части). Показано, что масштаб пространственной локализации волны определяется масштабом неоднородности плазмы и азимутальной компонентой волнового вектора. Ввиду наличия мнимой части частоты волны часть волновой энергии «просачивается» поперек магнитных оболочек, при этом ее амплитуда модулируется функцией Гаусса (рис. 7). Мнимая часть частоты определяет инкремент зеркальной неустойчивости, который принимает дискретный набор значений. Показано, что эффекты конечного ларморовского радиуса повышают порог зеркальной неустойчивости запертых мод, особенно для волн с большими азимутальными волновыми числами.

Установлена возможность существования резонатора поперек магнитных оболочек для дрейфово-компрессионных мод. Поперечная дисперсия в таком резонаторе обусловлена сцеплением с альфвеновской модой. Этот резонатор может существовать в областях магнитосферы с локальными экстремумами отношения плазменного давления к магнитному или частоты диамагнитного дрейфа.

Основные выводы и результаты диссертационной работы сформулированы в **Заключении**:

1. Теоретически исследована пространственная структура и эволюция со временем альфвеновских волн в двумерно-неоднородной модели магнитосферы с учетом неустойчивости за счет взаимодействия «волна-частица». Учтена кривизна силовых линий и конечное давление плазмы. При этом волны считаются генерированными как монохроматическим, так и импульсным источниками. Установлено, что в обоих случаях неустойчивость в конечном итоге порождает тороидальную волну. Это связано с трансформацией волны из полоидальной в тороидальную, вызванную в первом случае поляризационным расщеплением спектра (в конечном итоге кривизной силовых линий) и разбеганием по фазам во втором случае.

2. Определена пространственная структура и эволюция со временем

волнового поля стоячих азимутально-мелкомасштабных альфвеновских колебаний, генерированных источником конечной длительности во времени. Учтена кривизна силовых линий, приводящая к поляризованному расщеплению спектра. Установлена относительная роль различных факторов, приводящих к трансформации альфвеновских волн из полоидальных в тороидальные. Показано, что непосредственно после включения источника эволюция волны определяется явлением разбегания по фазам. Наличие поляризованного расщепления спектра приводит к формированию вблизи полоидальной поверхности волнового фронта, движущегося поперек магнитных оболочек по направлению к тороидальной поверхности. После прохождения волнового фронта в данной точке формируется практически установившаяся монохроматическая волна.

3. Определена пространственная структура и эволюция со временем волнового поля альфвеновских колебаний в моделях магнитосферы, генерированных импульсом поверхностного тока. Такие импульсы тока характерны для внезапного удара по магнитопаузе импульса давления солнечного ветра. Непосредственно после импульса в магнитном поле волны присутствуют как полоидальные, так и тороидальные компоненты. Обе компоненты колеблются в режиме биения, однако в полоидальной составляющей он более заметен, чем в тороидальной. Из-за разбегания по фазам энергия из полоидальной составляющей переходит в тороидальную. По прошествии времени волновое поле разделяется на тонкое ядро и широкий хвост колебания. Таким образом, на поверхности источника постепенно «вызревает» волна Альфвена с частотой, равной локальной альфвеновской частоте на этой поверхности. В хвосте волнового поля каждая силовая линия колеблется с локальной альфвеновской частотой на каждой магнитной оболочке.

4. Изучена генерация альфвеновской волны движущимся по азимуту облаком плазмы (например, возникшем при суббуревой инжекции заряженных частиц). Показано, что волна появляется в данной точке сразу после прохождения облака и далее распространяется по азимуту с фазовой скоростью, совпадающей со скоростью источника. В каждой точке частота волны равна собственной альфвеновской частоте. Азимутальное волновое число равно отношению собственной альфвеновской частоты к дрейфовой частоте. При реалистичных предположениях о концентрации и энергии частиц амплитуды генерируемых волн близки к наблюдаемым.

5. Изучена пространственная структура стоячих медленных магнитозвуковых волн в модели плазмы с кривизной силовых линий и двумерной неоднородностью плазмы при учете сцепления с альфвеновской модой. Показано, что ММЗ запертым между двумя магнитными оболочками, на одной из которых имеется резонанс, на второй — отсечка. Волна распространяется от поверхности отсечки к резонансной поверхности, где полностью поглощается. Полученные результаты применены для изучения устойчивости корональных арок на Солнце относительно гофрированных колебаний. Установлено, что инкремент неустойчивости увеличивается с уменьшением продольной длины волны и радиального волнового числа.

6. Изучено сцепление альфвеновских и быстрых магнитозвуковых волн в магнитосфере, обогащенной тяжелыми ионами — например, в магнитосфере планеты Меркурий. Установлено, что наблюдаемые в магнитосфере Меркурия УНЧ-колебания следует отождествить с ионно-ионными гибридными модами.

7. Изучено сцепление альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод в цилиндрической модели магнитосферы. Получены критерии и инкременты неустойчивости сцепленных мод, возникающей за счет взаимодействия волна-частица. Рассмотрена пространственная структура этих мод поперек магнитных оболочек. Показано, что при сцеплении альфвеновских и дрейфово-компрессионных мод возникает кинетический аналог баллонной неустойчивости. Получен критерий развития этой неустойчивости.

8. Изучено развитие зеркально-дрейфовой неустойчивости в анизотропной плазме при учете сцепления с альфвеновской модой. Показано, что сцепление зеркальной и альфвеновской мод приводит к появлению новых ветвей колебаний. Изучены дисперсионные свойства этих мод.

9. Показано, что в магнитосфере могут существовать условия для возникновения поперечных резонаторов для компрессионных мод кинетической природы — дрейфово-компрессионных и зеркально-дрейфовых мод. Поперечная дисперсия в таких резонаторах обусловлена эффектами конечного ларморовского радиуса и сцепления с альфвеновской волной. Установлены условия неустойчивости собственных мод колебаний в таких резонаторах.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Климушкин Д.Ю. Моды гидромагнитных колебаний неоднородной бесстолкновительной плазмы конечного давления // *Физика плазмы*. — 2006. — Т. 32. — С. 321–329.

Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Генерация альфвеновских волн движущейся неоднородностью плазмы в магнитосфере // *Физика плазмы*. — 2007. — Т. 33. — С. 435–442.

Черемных О.К., Климушкин Д.Ю., Костарев Д.В. О структуре азимутально-мелкомасштабных УНЧ колебаний горячей космической плазмы в кривом магнитном поле. Моды с непрерывным спектром // *Кинематика и физика небесных тел*. — 2014. — Т.30. — С. 3–21.

Черемных О.К., Климушкин Д.Ю., Магер П.Н. О структуре азимутально-мелкомасштабных УНЧ колебаний горячей космической плазмы в кривом магнитном поле. Моды с дискретным спектром // *Кинематика и физика небесных тел*. — 2016. — Т. 32. — С. 26–39.

Glassmeier K.-H., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Concerning ULF pulsations in Mercury's magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — Vol. 30, no. 18.

Klimushkin D.Yu. 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.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N. The spatio-temporal structure of impulse-generated azimuthally small-scale Alfvén waves interacting with high-energy charged particles in the magnetosphere // *Ann. Geophys.* — 2004. — Vol. 22.— P. 1053–1060.

Klimushkin D.Yu. Spatial structure and dispersion of drift mirror waves coupled with Alfvén waves in a 1-D inhomogeneous plasma // *Ann. Geophys.* — 2006. — Vol. 24.— pp. 2291–2297.

Klimushkin D.Yu., Chen L. Eigenmode stability analysis of drift-mirror modes in nonuniform plasmas // *Ann. Geophys.* — 2006. — V. 24. — P. 2435–2439.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Glassmeier K.-H. Axisymmetric Alfvén resonances in a multi-component plasma at finite ion gyrofrequency // *Ann. Geophys.* — 2006. — Vol. 24. — P. 1077–1084.

Klimushkin D.Yu. How energetic particles construct and destroy poloidal high-m Alfvén waves in the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* — 2007. — Vol. 55. — P. 722–730.

Klimushkin D.Yu., Podshibyakin I.Yu., Cao Jin Bin. Azimuthally small-scale Alfvén waves in magnetosphere excited by the source of finite duration // *Earth Planets Space.* — 2007. — Vol. 59. — P. 951–959.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N. On the spatial structure and dispersion of slow magnetosonic modes coupled with Alfvén modes in planetary magnetospheres due to field line curvature // *Planet. Space Sci.* — 2008. — V. 56. — P. 1273–1279.

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

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

Klimushkin D.Yu., Mager P.N. Coupled Alfvén and drift-mirror modes in non-uniform space plasmas: a gyrokinetic treatment // *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 2012. — V. 54. — 015006 (10pp).

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., and Glassmeier K.-H. Spatio-temporal structure of Alfvén waves excited by a sudden impulse localized on an L-shell // *Ann. Geophys.* — 2012. — Vol. 30. — P. 1099–1106.

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

Klimushkin D.Yu., Mager P.N. The Alfvén wave parallel electric field in non-uniform space plasmas // *Astrophysics and Space Science.* — 2014. — Vol. 350. — P. 579–583.

Klimushkin D.Yu., Nakariakov V.M., Mager P.N., Cheremnykh O.K. Corrugation instability of a coronal arcade // *Solar Phys.* — 2017. — Vol. 292. — P. 184.



## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Головчанская И.В., Корнилов И.А., Корнилова Т.А. и др. Признаки альвеновского резонанса в поведении авроральных дуг перед началом суббури // Геомагнетизм и аэрономия. — 2018. — Т. 58. — С. 46–52.

Гульельми А.В., Геомагнитные пульсации внемагнитосферного происхождения // Итоги науки и техники. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. — 1984. — Т. 7. — М.: ВИНТИ. — С.114–151.

Гульельми А.В., Потапов А.С. Об особенности поля МГД-волны в неоднородной плазме // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — 1984. — Вып. 70. — С. 149–157.

Гульельми А., Потапов А.С., Клайн Б.С. Комбинированная неустойчивость Рэлея–Тейлора–Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе // Солнечно-земная физика. — 2010. — Вып.15(128). — С.24–27.

Гульельми А.В., Фейгин Ф.З. Воздействие пондеромоторных сил на магнитосферу Земли // Физика Земли. — 2018. — №. 5. — С. 53–60.

Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. — М.: Наука, 1973.

Дмитриенко И.С., Леонович А.С., Мазур В.А. и др. МГД-волноводы в околоземной плазме // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — 1986. — Т.76. — С.145–164.

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

Ковтюх А.С. Резонанс ионов кольцевого тока с дрейфовыми волнами // Космические исследования. — 1998. — Т. 36, №2. — С. 142–155.

Козырева О.В., Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации и магнитные возмущения в начальную фазу сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2007. — Т. 47. — С. 501–511.

Кропоткин А.П. Ускорения электронов внешнего радиационного пояса локальными электрическими полями // Геомагнетизм и аэрономия. — 2021. — Т. 61. — С. 411–417.

Леонович А.С., Мазур В.А. Линейная теория МГД-колебаний в магнитосфере. — М.: Физматлит, 2016.

Леонович А.С., Мишин В.В. Поток энергии магнитозвуковых волн из солнечного ветра в магнитосферу // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — 1999. — Т. 34 — С. 52–58.

Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.

Мазур В.А. Резонансное возбуждение магнитосферы гидромагнитными волнами, падающими из солнечного ветра // Физика плазмы. — 2010. — Т. 36 — С. 1013–1023.

Мазур В.А., Чуйко Д.А. Возбуждение магнитосферного МГД-резонатора неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца // Физика плазмы. — 2011. — Т. 37. — С. 979–1000.

Михайловский А.Б., Похотелов О.А. Новый механизм генерации геомагнитных пульсаций быстрыми частицами // Физика плазмы. — 1975. — Т. 1. — С. 786–792.

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. — С. 107–118.

Моисеев А.В., Стародубцев С.А., Мишин В.В. Особенности возбуждения и распространения по азимуту и меридиану длиннопериодных P<sub>3</sub> колебаний геомагнитного поля 8 декабря 2017 г. // Солнечно-земная физика. — 2020. — Т. 6, № 3. — С. 56–72.

Потапов А.С. Возбуждение геомагнитных пульсаций типа P<sub>3</sub> перед фронтом околосолнечной ударной волны пучком отраженных протонов // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. — 1974. — С. 3–12.

Потапов А.С., Цэгмэд Б., Рыжакова Л.В. Связь потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите с уровнем УНЧ активности на поверхности Земли и в солнечном ветре в 23-м цикле солнечной активности // Космические исследования. — 2012. — Т. 50. — С. 130–146.

Agapitov A.V., Cheremnykh O.K. Magnetospheric ULF waves driven by external sources // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2013. — Vol. 3. — P. 12–19.

Alperovich L.S., Fedorov E.N. Hydromagnetic Waves in the Magnetosphere and the Ionosphere. Springer, 2007.

Antonova E.E., Kornilov I.A., Kornilova T.A. et al. Features of auroral breakup obtained using data of groundbased television observations: case study // Annales Geophysicae. — 2009. — Vol. 27, no. 4. — P. 1413–1422.

Atkinson G., Watanabe T. Surface waves on the magnetospheric boundary as a possible origin of long period geomagnetic micropulsations // Earth and Planetary Science Letters. — 1966. — Vol. 1. — P. 89–91.

Boardsen S.A., Slavin J.A., Anderson B.J. et al. Survey of coherent ~ 1 Hz waves in Mercury's inner magnetosphere from MESSENGER observations // J. Geophys. Res. — 2012. — Vol. 117. — P. A00M05.

Buchsbaum S.J. Resonance in a plasma with two ion species // Phys. Fluids. — 1960. — Vol. 3. — P. 418–420.

Cooper M.B., Gerrard A.J., Lanzerotti L.J. et al. Mirror Instabilities in the Inner Magnetosphere and Their Potential for Localized ULF Wave Generation // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2021. — Vol. 126, no. 2. — P. e2020JA028773.

Denton R.E., Takahashi K., Galkin I. A. et al. Distribution of density along magnetospheric field lines // J. Geophys. Res. — 2006. — V. 111. — A04213.

Faganello M., Califano F. Magnetized Kelvin–Helmholtz instability: theory and simulations in the Earth's magnetosphere context // Journal of Plasma Physics. — 2017. — Vol. 83, no. 6. — P. 535830601.

Glassmeier K.H., Espley J. ULF Waves in Planetary Magnetospheres // Mag-

netospheric ULF Waves: Synthesis and New Directions. — American Geophysical Union, 2006. — P. 341–359. — ISBN: 9781118666319.

Guglielmi A., Lundin R. Ponderomotive upward acceleration of ions by ion cyclotron and Alfvén waves over the polar regions // *J. Geophys. Res.* — 2001. — Vol. 106. — P. 13219–13236.

Hiraki Y., Watanabe T. Feedback instability analysis for dipole configuration with ionospheric and magnetospheric cavities // *J. Geophys. Res.* — 2011. — Vol. 116, no. A11. — A11220.

Hughes W.J., Southwood D.J., Mauk B. et al. Alfvén waves generated by an inverted plasma energy distribution // *Nature.* — 1978. — Vol. 275. — P. 43–45.

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

Keiling A. The Dynamics of the Alfvénic Oval // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* — 2021. — Vol. 219. — P. 105616.

Klimushkin D.Yu. Resonators for hydromagnetic waves in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* — 1998a. — Vol. 103. — P. 2369–2375.

Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Engebretson M.J. et al. Correspondence between the ULF wave power spatial distribution and auroral oval boundaries // *Солнечно-земная физика.* — 2016. — Т. 2. — С. 35–45.

Lam H.L., Rostoker G. The relationship of Pc5 micropulsation activity in the morning sector to the auroral westward electrojet // *Planet. Space Sci.* — 1978. — Vol. 26. — P. 473–492.

Leonovich A.S., Mazur V.A. A theory of transverse smallscale standing Alfvén waves in an axially symmetric magnetosphere // *Planet. Space Sci.* — 1993. — Vol. 41. — P. 697–717.

Leonovich A.S., Mazur V.A. Magnetospheric resonator for transverse-small-scale standing Alfvén waves // *Planet. Space Sci.* — 1995b. — Vol. 43. — P. 881–883.

Leonovich A. S., Mishin V. V., Cao J. B. Penetration of magnetosonic waves into the magnetosphere: influence of a transition layer // *Annales Geophysicae.* — 2003. — Vol. 21. — P. 1083–1093.

Mager O.V. Alfvén Waves Generated Through the Drift-Bounce Resonant Instability in the Ring Current: A THEMIS Multi-Spacecraft Case Study // *Journal of Geophysical Research (Space Physics).* — 2021. — Vol. 126, no. 11. — P. e29241.

Mager P.N., Mikhailova O.S., Mager O.V. et al. Eigenmodes of the Transverse Alfvénic Resonator at the Plasmapause: A Van Allen Probes Case Study // *Geophysical Research Letters.* — 2018. — Vol. 45. — P. 10796–10804.

Mathie R.A., Mann I.R. On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at midlatitudes: Implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt // *J. Geophys. Res.* — 2001. — Vol. 106. — P. 29783–29796.

Mathioudakis M., Jess D. B., Erdelyi R. Alfvén Waves in the Solar Atmosphere. From Theory to Observations // *Space Sci. Rev.* — 2013. — Vol. 175. — P. 1–27.

Menk F. W., Waters C. L. Magnetoseismology: Groundbased remote sensing of the Earth's magnetosphere. — John Wiley and Sons, 2013.

Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin-Helmholtz instability // *J. Geophys. Res.* — 1993. — Vol. 98. — P. 21365–21371.

Nakariakov V. M., Pilipenko V., Heilig B. et al. Magneto-hydrodynamic Oscillations in the Solar Corona and Earth's Magnetosphere: Towards Consolidated Understanding // *Space Sci. Rev.* — 2016. — Vol. 200. — P. 75–203.

Pilipenko V., Kleimenova N., Kozyreva O. et al. Long-period magnetic activity during the May 15, 1997 storm // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* — 2001. — Vol. 63. — P. 489–501.

Pilipenko V., Belakhovsky V., Murr D. et al. Modulation of total electron content by ULF Pc5 waves // *J. Geophys. Res.* — 2014. — Vol. 119. — P. 4358–4369.

Plaschke F., Glassmeier K.H. Properties of standing Kruskal-Schwarzschild-modes at the magnetopause // *Ann. Geophys.* — 2011. — Vol. 29. — P. 1793–1807.

Potapov A.S. ULF wave activity in high-speed streams of the solar wind: Impact on the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* — 2013. — Vol. 118. — P. 6465–6477.

Rae I.J., Murphy K.R., Watt C.E.J. et al. Field line resonances as a trigger and a tracer for substorm onset // *J. Geophys. Res.* — 2014. — Vol. 119. — P. 5343–5363.

Rae I.J., Watt C. ULF Waves above the Nightside Auroral Oval during Substorm Onset // *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series.* — 2016. — Vol. 216. — P. 99–120.

Rubtsov A.V., Mikhailova O.S., Mager P.N. et al. Multispacecraft Observation of the Presubstorm Long-Lasting Poloidal ULF Wave // *Geophys. Res. Lett.* — 2021. — Vol. 48, no. 23. — P. e96182.

Samson J.C., Wallis D.D., Hughes T.J. et al. Substorm intensifications and field line resonances in the nightside magnetosphere // *J. Geophys. Res.* — 1992. — Vol. 97, no. A6. — P. 8495–8518.

Vetoulis G., Chen L. Global structures of Alfvén-ballooning modes in magnetospheric plasmas // *Geophys. Res. Lett.* — 1994. — Vol. 21. — P. 2091–2094.

Wilson C.R., Sugiura M. Hydromagnetic interpretation of sudden commencements of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* — 1961. — Vol. 66, no. 12. — P. 4097–4111.

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.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН  
Заказ № от 2023 г.  
Объем 29 с. Тираж 150 экз.