

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



**Костарев Данила Владимирович**

**КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ  
АЗИМУТАЛЬНО-МЕЛКОМАСШТАБНЫХ  
КОМПРЕССИОННЫХ ВОЛН  
В МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ**

Специальность 25.00.29 –  
«физика атмосферы и гидросферы»

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

Иркутск — 2019

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

**Научный руководитель:**

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

**Официальные оппоненты:**

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

**Пилипенко Вячеслав Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, заведующий лабораторией

**Ведущая организация:**

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

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

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

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

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Поляков В.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Магнитосфера Земли, образованная взаимодействием солнечного ветра и земного магнитного поля, — это естественный щит, защищающий все живое на поверхности планеты от вредного воздействия частиц солнечного ветра, а также от других заряженных частиц в космосе. С развитием космической техники, которая тоже подвержена влиянию заряженных частиц, задача диагностики земной магнитосферы стала еще более актуальна. Одним из эффективных средств мониторинга магнитосферы является интерпретация данных об ультранизкочастотных (УНЧ) волнах (период 0.1 — 600 с), которые еще называют геомагнитными пульсациями [Гульельми, Троицкая, 1973].

Геомагнитные пульсации представляют собой магнитогидродинамические (МГД) волны, возбуждаемые различными неустойчивостями на магнитопаузе (область, где давление солнечного ветра уравнивается давлением земного магнитного поля) или внутри магнитосферы. Данные о таких колебаниях могут быть получены в магнитных обсерваториях [Howard, Menk, 2005] а также с помощью радарных установок [Allan et al., 1982; Chelpanov et al., 2016] и искусственных спутников Земли [Barfield, McPherron, 1972]. Полученные данные используются для верификации теоретических моделей, разрабатываемых для описания, выявления причин и следствий наблюдаемых явлений.

Для классификации геомагнитных пульсаций используется устоявшаяся классификация: непрерывные пульсации (pulsations continuous, Pc) и импульсные, или иррегулярные (pulsations irregular, Pi) пульсации. В свою очередь, каждый из этих классов подразделяется на подклассы, в зависимости от периода колебаний. Непрерывные пульсации делятся на Pc1 с периодом 1–5 с, Pc2 (5–10 с), Pc3 (10–45 с), Pc4 (45–150 с), Pc5 (150–600 с) и Pc6 (> 600 с). Иррегулярные делятся на Pi1 (1–40 с), Pi2 (40–150 с) и Pi3 (> 150 с). Данная диссертационная работа посвящена исследованию колебаний с наиболее низкой частотой, относящихся к частотному диапазону Pc5 и ниже.

Помимо частотного фактора, для классификации геомагнитных пульсаций используют значение азимутального волнового числа  $m$  (количество периодов волны, укладываемых по азимуту). Обычно выделяют волны с малыми ( $m \sim 1$ ) и большими ( $m \gg 1$ ) азимутальными волновыми числами. Это обусловлено различием в их пространственно-временной структуре, разницей источников и методов наблюдения [Eriksson, 2007].

Среди волн с большими азимутальными волновыми числами в диапазоне Pc5 и ниже можно выделить группу буревых компрессионных колебаний (storm-time pulsations), обычно наблюдаемых при больших отрицательных значениях  $Dst$ -индекса и увеличенном кольцевом токе [Barfield, McPherron, 1978]. Такие колебания наблюдаются как азимутально-мелкомасштабные компрессионные волны, распространяющиеся вблизи геомагнитного экватора, как на запад, так и на восток. При этом частоты некоторых из них суще-

ственно ниже основной частоты альфвеновского резонанса той магнитной оболочки, на которой эти волны наблюдаются.

В настоящее время существующие теории не могут адекватно объяснить наблюдаемые буревые пульсации в диапазоне Pc5 с частотами много ниже альфвеновских. Эти пульсации чаще всего отождествляют с зеркальной неустойчивостью [Hasegawa, 1969; Pokhotelov et al., 1985; Klimushkin, Chen, 2006; Rae et al., 2007] или полоидальными альфвеновскими модами [Klimushkin, 1997; Mager, Klimushkin, 2002]. Однако для зеркальной неустойчивости необходима сильная анизотропия тепловых скоростей частиц поперек и вдоль магнитных силовых линий, которой не видно в экспериментальных данных, а наименьшая частота полоидальных альфвеновских мод, рассчитанная для точки наблюдения, оказывается значительно выше реально наблюдаемой частоты волн. В то же время дрейфово-компрессионные моды хорошо удовлетворяют экспериментальным данным, так как их частота может быть значительно ниже альфвеновской.

При статистическом анализе УНЧ-волн во время суббуревой активности видно, что волны распространяются в направлении дрейфа как протонов, так и электронов, как в работе [James et al., 2013], основанной на радарных данных сети SuperDARN. Кроме того, данные показывают, что частоты некоторых из этих волн значительно ниже частот пульсаций Pc5. Скорее всего, эти колебания являются дрейфово-компрессионными модами. При этом, если волна распространяется в направлении дрейфа протонов, то происходит ее усиление за счет резонансного взаимодействия с потоками энергичных протонов, а при распространении колебаний в направлении дрейфа электронов происходит резонансное взаимодействие с потоками энергичных электронов. Стоит отметить, что предыдущие исследования не рассматривали дрейфово-компрессионные волны при немономонном распределении частиц по скоростям, хотя в спутниковых данных при наблюдении буревых компрессионных Pc5-волн обычно фиксируются потоки энергичных частиц т. е. частицы имеют инверсное распределение. Взаимодействие дрейфово-компрессионных мод с электронами ранее не рассматривалось, хотя данные радаров свидетельствуют о существовании колебаний, распространяющихся на восток, т. е. волны распространяются в направлении дрейфа электронов и могут с ними резонансно взаимодействовать [Chelpanov et al., 2016; Hori et al., 2018].

В данной диссертационной работе рассмотрены ситуации, когда волны распространяются как в направлении дрейфа как протонов, так электронов. В отличие от большинства исследований функции распределения частиц, считались инверсными, т. е. имеющими максимум в высокоэнергичной части [Hughes et al., 1978]. При этом аналитически показано, что энергичные протоны могут раскачивать волны, бегущие на запад, а энергичные электроны — волны, бегущие на восток. Для практического применения найдены условия, при которых такая неустойчивость может существовать.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Основной целью диссертационной работы является исследование в рамках гирокинетики азимутально-мелкомасштабных компрессионных волн в аксиально-симметричной модели магнитосферы с изотропной плазмой. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. В рамках кинетического подхода рассмотреть компрессионные УНЧ-волны в однородном магнитном поле при различных предположениях о составе плазмы. Изучить влияние наличия в плазме примеси холодных электронов и анизотропии скоростей частиц поперек и вдоль магнитного поля на условия неустойчивости.

2. В рамках гирокинетики исследовать продольную структуру дрейфово-компрессионных мод в аксиально-симметричной двумерно-неоднородной модели магнитосферы.

3. В рамках гирокинетики получить дисперсионное уравнение и условия возникновения неустойчивостей для дрейфово-компрессионных мод, распространяющихся в направлении магнитного дрейфа энергичных протонов при наличии инверсного распределения протонов по скоростям в аксиально-симметричной двумерно-неоднородной модели магнитосферы.

4. В рамках гирокинетики получить дисперсионное уравнение и условия возникновения неустойчивостей для дрейфово-компрессионных мод, распространяющихся в направлении магнитного дрейфа энергичных электронов при наличии инверсного распределения электронов по скоростям в аксиально-симметричной двумерно-неоднородной модели магнитосферы.

### **Научная новизна**

1. Впервые в рамках кинетического подхода изучено влияние концентрации холодных электронов и степени анизотропии тепловых скоростей частиц вдоль и поперек магнитного поля на структуру дисперсионного уравнения. Получены условия, при которых решение сводится к магнитогидродинамическому случаю медленных магнитозвуковых (ММЗ) волн или к кинетическому случаю зеркальной моды.

2. Впервые найдено и решено интегральное уравнение, описывающее продольную структуру дрейфово-компрессионной моды в аксиально-симметричной двумерно-неоднородной модели магнитосферы. Показано, что эти моды имеют симметричную относительно геомагнитного экватора структуру и локализованы вблизи него.

3. Впервые найдены условия существования и развития неустойчивости для дрейфово-компрессионных волн, распространяющихся в направлении магнитного дрейфа энергичных протонов при инверсном распределении протонов по скоростям в аксиально-симметричной двумерно-неоднородной модели магнитосферы.

4. Впервые найдены условия существования и развития неустойчивости для дрейфово-компрессионных волн, распространяющихся в направлении

магнитного дрейфа энергичных электронов при инверсном распределении электронов по скоростям в аксиально-симметричной двумерно-неоднородной модели магнитосферы.

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

В работе в рамках гирокинетики показано, что в однородной плазме в однородном магнитном поле при различных отношениях плотностей холодных и горячих электронов дисперсионное соотношение компрессионной моды будет иметь различный вид и в зависимости от параметров может быть сведено к дисперсионному уравнению ММЗ-моды либо к уравнению кинетической моды. При этом анизотропия тепловых скоростей частиц поперек и вдоль линий магнитного поля приводит к растущей неосциллирующей зеркальной МГД-моду или осциллирующей растущей кинетической зеркальной моде.

В работе получено и решено уравнение, описывающее продольную структуру дрейфово-компрессионных волн. Показана локализация и симметрия этих волн относительно геомагнитного экватора и возможность их распространения как в направлении дрейфа протонов, так и в обратном направлении. При этом найдены условия возникновения неустойчивостей для каждого случая. Показано влияние градиентов концентрации и температуры на условия существования волн и развитие связанных с этими волнами неустойчивостей.

В работе исследовалось влияние немонотонного распределения частиц по энергиям на условия неустойчивости дрейфово-компрессионных волн. Найдены условия, при которых частицы могут резонансно взаимодействовать с волной.

Результаты данной диссертационной работы могут быть использованы при интерпретации данных, полученных с искусственных спутников Земли, радарных установок, а также интегрированных данных космических и наземных наблюдений. В частности, уже было получено хорошее согласие с экспериментальными данными [Mager et al., 2015; Chelpanov et al., 2016, Rubtsov et al., 2018, Hori et al., 2018].

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных в работе результатов является следствием использования строгих методов математического анализа. Выражения, полученные в первой главе в предельных случаях, сводятся к известным выражениям МГД-приближения. Численные оценки частот, приведенные во второй и третьих главах, соответствуют наблюдаемым в радарных исследованиях частотам. Локализация дрейфово-компрессионных волн вблизи геомагнитного экватора, найденная в работе, тоже хорошо согласуется с результатами спутниковых исследований.

### **Личный вклад автора**

Задачи, поставленные в данной диссертационной работе, решены автором лично или при его непосредственном участии. Аналитические выражения, численные расчеты и оценки, полученные в результате данной работы, вы-

полнены диссертантом. Все рисунки, графики и таблицы, за исключением тех, в которых есть ссылка на источник, выполнены автором. Автор диссертации представлял устные и стендовые доклады на конференциях и семинарах, участвовал в подготовке научных статей и активно участвовал в обсуждениях и интерпретации полученных результатов.

### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- X Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, ИКИ РАН, 3–5 апреля 2013.
- Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде», Иркутск, 2013.
- Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвященная 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова, Иркутск, 16–21 сентября 2013.
- Chapman Conference on Low-Frequency Waves in Space Plasmas, Jeju Island, Republic of Korea, 31 August 2014 — 05 September 2014.
- Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде», Иркутск, 2017.
- Second VarSITI General Symposium, Irkutsk, Russia, 10–15 July, 2017.
- Научные семинары в ИСЗФ СО РАН и ИФЗ РАН.

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

1. Установлено, что поперечная компрессионная волна в однородной плазме в зависимости от концентрации холодных электронов имеет два различных режима распространения и соответствующие им два режима зеркальной неустойчивости, обусловленной анизотропией плазмы.

2. Установлено, что в дипольноподобной модели магнитосферы дрейфово-компрессионные волны имеют дискретный набор гармоник, которые узко локализованны в окрестности геомагнитного экватора. При этом собственная частота каждой гармоники на данной магнитной оболочке обратно пропорциональна азимутальной длине волны.

3. Предложен механизм генерации длиннопериодных компрессионных волн при дрейфовом резонансе с энергичными протонами в рамках дипольноподобной модели магнитосферы. В этом случае волна генерируется неустойчивостью, развивающейся при положительных градиентах температуры плазмы и инверсной функции распределения протонов.

4. Установлено, что дрейфовый резонанс длиннопериодных компрессионных волн с энергичными электронами может приводить к неустойчивости, генерирующей волны, распространяющиеся в восточном направлении. При этом частота волны определяется давлением протонов.

### **Публикации**

Материалы, используемые в диссертации, опубликованы в 8 печатных работах, из них 4 статьи — в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и ADS и рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций.

### **Структура и объем диссертации**

Данная диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 85 страниц, включая 16 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 108 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит основные сведения о земной магнитосфере, краткую историю развития и современные представления о геомагнитных пульсациях. Описана классификация ультранизкочастотных волн в зависимости от частоты колебаний и значения азимутального волнового числа. Кратко представлены основные теоретические модели, описывающие пространственно-временную структуру и механизмы генерации геомагнитных пульсаций. Во введении описаны также задачи, актуальность и научная новизна диссертационной работы.

В **главе 1** приведен вывод дисперсионных уравнений компрессионных волн с помощью кинетического подхода в бесстолкновительной многокомпонентной плазме в однородном магнитном поле при наличии анизотропии тепловых скоростей частиц вдоль и поперек магнитного поля. Исследуемая модель плазмы состоит из ядра холодных протонов и горячих электронов и имеет примесь горячих протонов и холодных электронов. Горячими считаются частицы, тепловая скорость которых больше продольной фазовой скорости волны, холодными — частицы, тепловая скорость которых меньше продольной фазовой скорости волны.

Для вывода основных уравнений переменные принимаются по аналогии с работой [Chen, Hasegawa, 1991]. В систему, состоящую из уравнения квазинейтральности в ультранизкочастотном пределе, когда фазовая скорость волны гораздо меньше скорости света [Antonsen, Lane, 1981; Catto et al., 1981], и выражения для продольной компоненты уравнения движения плазмы (уравнение баланса сил) [Pokhotelov et al., 2000; Klimushkin, Chen, 2006], вводится функция распределения, проинтегрированная по фазе ларморовского вращения, при условии пренебрежения ларморовским радиусом [Chen, Hasegawa, 1991]. Функция распределения выбрана би-максвелловской для учета анизотропии скоростей частиц поперек и вдоль внешнего магнитного поля.

Далее воспроизводится известное из МГД дисперсионное уравнение компрессионных мод в предположении, что плазма состоит только из холодных ионов и горячих электронов, концентрации которых одинаковы. Кроме того, плазма полагается изотропной, а мнимая часть частоты волны много меньше ее реальной части. В результате получается хорошо известное из магнитной гидродинамики дисперсионное уравнение магнитозвуковых волн [Кадомцев, 1976],



но полученное исходя из сугубо кинетических представлений. Достойным особого внимания выступает факт, что в рамках кинетики корректное дисперсионное уравнение магнитного звука возможно получить только при учете параллельного электрического поля волны, отсутствующего в МГД.

Далее рассматривается волна, распространяющаяся практически перпендикулярно внешнему магнитному полю и при пренебрежимо малом содержании холодных электронов в предположении, что распределение ионов изотропно. В этом случае, если считать, что мнимая часть частоты волны много меньше ее реальной части, действительная часть дисперсионного соотношения будет определяться известным из МГД соотношением для ММЗ [Кадоццев, 1976]. Как и в случае без примесей, существенным является учет параллельного электрического поля волны, отсутствующего в гидродинамике. Таким образом, наличие как продольного магнитного, так и продольного электрического поля является необходимым признаком ММЗ в кинетическом подходе.

Если рассмотреть предыдущее уравнение, но с учетом анизотропии тепловых скоростей горячих протонов, то частота становится мнимой, а начальное возмущение разбивается на суперпозицию экспоненциально затухающего и экспоненциально растущего возмущений. При этом растущее решение называется зеркальной неустойчивостью [Веденов и др., 1961; Калсруд, 1983]. Необходимым условием развития неустойчивости является сильная анизотропия давления плазмы.

Следующим шагом рассматривается случай, когда волна распространяется практически перпендикулярно внешнему магнитному полю, но в плазме содержится примесь холодных электронов. Если учитывать анизотропию тепловых скоростей горячих протонов, то в предположении, что давление холодных протонов мало, полученная мода будет иметь два неколебательных решения: растущее и затухающее. Критерий неустойчивости будет таким же, как для зеркальной неустойчивости без холодных электронов, однако поведение будет иным, таким как в работе [Hasegawa, 1969].

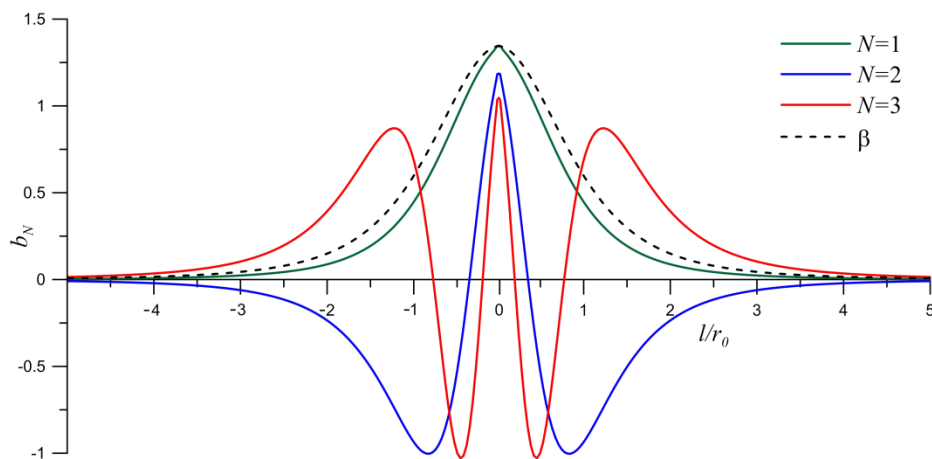
В **главе 2** рассматриваются дрейфово-компрессионные волны, распространяющиеся в сторону дрейфа протонов в приближении гирокинетики [Hasegawa, 1991] для аксиально-симметричной модели магнитосферы и инверсной функции распределения протонов по энергиям. Мы считаем, что такой модой можно описывать ту часть наблюдаемых азимутально-мелкомасштабных компрессионных УНЧ-волн, фиксируемых при больших отрицательных значениях  $Dst$ -индекса в ночной, вечерней и утренней областях магнитосферы [Barfield, McPherron, 1972]. Частоты этих волн значительно ниже характерных частот альфвеновского резонанса для магнитных оболочек, на которых эти волны наблюдаются [Klimushkin, 1997; Mager, Klimushkin, 2002]. В пользу дрейфово-компрессионных мод выступает тот факт, что температурная анизотропия наблюдаемой магнитосферной плазмы недостаточна для возникновения дрейфово-зеркальных мод [Hasegawa, 1969; Klimushkin, Chen, 2006].

Функция распределения протонов по энергиям предполагается немонотонной с максимумом в высокоэнергичной части, так как буревые компрессионные волны наблюдаются одновременно с потоками энергичных частиц в магнитосфере [Hughes et al., 1978; Glassmeier et al., 1999].

Рассматриваемая аксиально-симметричная модель магнитосферы учитывает, что концентрация и температура плазмы, магнитное поле Земли, изменяются вдоль и поперек магнитных оболочек.

За основу берется система уравнений, полученная в рамках гирокинетики в поперечном ВКБ-приближении [Chen, Hasegawa, 1991; Antonsen, Lane, 1980; Catto et al., 1981] при малом ларморовском радиусе протонов, с учетом того, что частота рассматриваемых колебаний много ниже баунс-частоты протонов. В случае компрессионного резонанса структура продольного магнитного поля волны будет определяться собственными функциями однородного интегрального уравнения Фредгольма второго рода. Численное решение этого уравнения показывает, что собственные функции  $b_N$  сильно локализованы вблизи геомагнитного экватора и симметричны относительно него. Схожее поведение характерно для параметра  $\beta$ , определяемого отношением газодинамического давления к магнитному (см. рисунок).

Далее из дисперсионного соотношения найдены собственные частоты волны и условия неустойчивости в случае, когда азимутальная фазовая скорость волны совпадает по направлению со скоростью магнитного дрейфа (в противном случае, взаимодействие волна — частица отсутствует). Из дисперсионного соотношения видно, что частота дрейфово-компрессионной волны пропорциональна азимутальному волновому числу, что не характерно для альфвеновских мод.



Продольная структура первых трех собственных функций  $b_N$  дрейфово-компрессионной моды при компрессионном резонансе. Штриховая линия показывает поведение параметра  $\beta$ .

Показано, что дрейфово-компрессионные волны могут генерироваться инверсностью функции распределения протонов даже в случае отсутствия градиентов температуры и концентрации плазмы, когда скорость магнитного дрейфа частиц, энергия которых соответствует максимуму инверсной функ-

ции, будет больше азимутальной фазовой скорости волны. В тех же условиях, но при распределении Максвелла, неустойчивости не будет. Кроме того, неустойчивость возможна в случае, когда скорость температурного диамагнитного дрейфа меньше скорости магнитного дрейфа или имеет противоположное ей направление. Для распределения Максвелла неустойчивость возможна при положительном радиальном градиенте температуры горячей компоненты плазмы в магнитосфере.

В главе 3 рассматриваются дрейфово-компрессионные волны в той же модели магнитосферы и в том же формализме, как и в предыдущей главе, но распространяющиеся в сторону дрейфа электронов при инверсном распределении последних. Такая постановка задачи объясняется тем, что наблюдаемые буревые компрессионные Pc5-волны могут распространяться в направлении дрейфа электронов [James et al., 2013]. Обычно при этом в тех же областях магнитосферы фиксируются немонотонные распределения энергичных частиц.

В этом случае рассматривается резонанс волна — частица с электронами, где в отличие от предыдущих работ [Crabtree et al., 2003; Klimushkin, Mager, 2011; Mager et al., 2013] в уравнении для дрейфово-компрессионной моды знак в резонансном знаменателе члена, описывающего вклад горячих протонов, станет положительным. Это значит, что для протонов резонанса волна — частица не будет, но такой резонанс появится для электронов, так как знак в резонансном знаменателе уравнения, описывающего вклад горячих электронов, напротив, станет отрицательным. При этом структура продольного магнитного поля волны будет такой же, как найденная нами в главе 2 (см. рис. 1).

Далее получено дисперсионное соотношение и выполнено его разложение для случая, приближенного к условиям кольцевого тока, когда энергия протонов много больше энергии электронов. Для упрощения концентрации горячих протонов и горячих электронов, которые вносят вклад в давление плазмы, считались равными. Аналитически анализируется два предельных случая этого выражения, а общий случай рассмотрен при помощи численных методов.

Для аналитически рассмотренных случаев, когда собственная частота волны много меньше дрейфовой частоты электронов и когда она много больше дрейфовой частоты электронов, выполнено разложение дисперсионного соотношения по малым параметрам, после чего найдены условия существования и неустойчивости волн. Показана возможность распространения волны в направлении дрейфа электронов в отсутствие градиентов температуры или концентрации плазмы. При этом неустойчивость возможна как за счет градиентов температуры и концентрации электронов при их монотонном распределении, так и в отсутствие градиентов, когда причиной неустойчивости может быть инверсное распределение электронов. Наибольшую раскачку волны приобретают при разнонаправленных радиальных градиентах температуры и концентрации электронов в сочетании с инверсностью распределения энергичных электронов по энергиям.

Далее выполнен ряд численных расчетов, из результатов которых видно, что неустойчивость имеет максимальный инкремент, когда собственная ча-

стота дрейфово-компрессионной моды близка дрейфовой частоте электронов. Однако полученные численные результаты служат только иллюстрацией возможности существования неустойчивости, так как в приведенных примерах рассмотрена горячая плазма (газокинетическое давление плазмы больше магнитного,  $\beta > 1$ ), в то время как в магнитосфере Земли обычно плазма холодная. При подстановке реалистичных параметров магнитосферы показано, что частота дрейфово-компрессионной волны оказывается ниже частоты альфвеновского резонанса при тех же параметрах.

Еще важно отметить, что частота дрейфово-компрессионной волны, бегущей на восток, пропорциональна азимутальному волновому числу, как и в случае с распространяющейся на запад волной. Можно сделать вывод, что зависимость частоты волны от азимутального волнового числа является отличительной характеристикой дрейфово-компрессионных мод.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

1. А. Дисперсионное соотношение, найденное нами в рамках гирокинетики в однородном магнитном поле и при условии пренебрежения холодными электронами (электроны, тепловая скорость которых меньше фазовой скорости волны), а также при отсутствии анизотропии частиц по скоростям, полностью совпадает с уравнением для ММЗ-волн, получаемым в МГД-подходе. Для получения корректного дисперсионного уравнения магнитного звука в рамках кинетики необходимо учитывать параллельное электрическое поле волны, которое отсутствует в МГД.

Б. Рост анизотропии до определенного в работе предела при кинетическом рассмотрении вызывает неустойчивость, поведение которой сходно с поведением зеркальной неустойчивости, полученной в рамках МГД. Из-за схожести решений такую моду можно назвать МГД-зеркально-неустойчивой, хотя все уравнения получены исключительно в рамках кинетики.

В. Когда в рассматриваемой плазме концентрация холодных электронов будет больше отношения массы электрона к массе протона и в отсутствие анизотропии скоростей частиц будет существовать только неосциллирующая затухающая мода. Другими словами, даже малая концентрация холодных электронов приводит к невозможности распространения ММЗ-колебаний в плазме, где тепловые скорости частиц поперек и вдоль магнитного поля распределены равномерно. Однако при росте анизотропии скоростей частиц поперек и вдоль магнитного поля до определенных в работе пределов появляется растущая мода, которую можно назвать кинетической зеркально-неустойчивой модой.

2. А. Исходя из уравнений гирокинетики в аксиально-симметричной двумерно-неоднородной модели магнитосферы получено интегральное уравнение, описывающее продольную структуру дрейфово-компрессионной моды. Численное решение этого уравнения показывает, что такие моды узко локализованы в районе геомагнитного экватора, а также симметричны относительно него. Эти выводы подтверждаются экспериментально [Higuchi, Kokubun, 1988].

Б. Установлено, что дрейфово-компрессионные моды могут распространяться в направлении дрейфа протонов. При этом неустойчивость может возникать как из-за градиентов температуры и плотности частиц, так и из-за инверсности распределения.

В. При монотонном распределении частиц неустойчивость может быть вызвана различными комбинациями градиентов плотности и температуры. При этом направление фазовой скорости волны должно совпадать с направлением дрейфа энергичных частиц.

Г. Инверсное распределение частиц по энергиям само по себе провоцирует неустойчивость дрейфово-компрессионных мод, если фазовая скорость волны меньше скорости дрейфа частиц с энергией, соответствующей максимуму функции распределения. Наибольшие инкременты возникают в случае положительного радиального градиента температуры и отрицательного плотности.

Д. Аналитически показана зависимость частоты дрейфово-компрессионной волны от азимутального волнового числа, что наблюдается экспериментально [Mager et al., 2015; Chelpanov et al., 2016; Rubtsov et al., 2018].

3. А. Установлено, что дрейфово-компрессионные моды могут распространяться в направлении дрейфа электронов. При этом неустойчивость может возникать как из-за градиентов температуры и плотности частиц, так и из-за инверсности распределения.

Б. При монотонном распределении частиц неустойчивость может быть вызвана различными комбинациями градиентов плотности и температуры. При этом направление фазовой скорости волны должно совпадать с направлением дрейфа энергичных частиц. Однако полученные численные оценки говорят о том, что для развития неустойчивости при распределении Максвелла, градиенты должны быть достаточно большими, что вряд ли выполняется в земной магнитосфере.

В. Инверсное распределение частиц по энергиям само по себе провоцирует неустойчивость дрейфово-компрессионных мод, если фазовая скорость волны меньше скорости дрейфа частиц с энергией, соответствующей максимуму функции распределения.

Г. Аналитически показана зависимость частоты дрейфово-компрессионной волны от азимутального волнового числа.

### **Публикации по теме диссертации**

Публикации в рецензируемых научных журналах, включенных в международные базы цитирования Web of Science и ADS:

Klimushkin D.Yu., Kostarev D.V. Two kinds of mirror modes in a nonzero electron-temperature plasma // *Plasma Phys. Control. Fusion* 54 (2012) 092001, 2012.

Mager P.N., Klimushkin D.Yu., 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.

Cheremnykh O.K., Klimushkin D.Yu., Kostarev D.V. On the structure of azimuthally small-scale ULF oscillations of hot space plasma in a curved magnetic

field. modes with continuous spectrum. ISSN 08845913 // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2014. – Vol. 30. – N. 5. – P. 209–222.

Kostarev D.V., Mager P.N. Drift-compressional waves propagation in the direction of energetic electron drift in the magnetosphere // *Solar-Terrestrial Physics*. – 2017. – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 18–27.

### **Прочие публикации**

Костарев Д.В., Климушкин Д.Ю., Магер П.Н. Генерация дрейфово-компрессионных волн инверсным распределением частиц по энергиям в магнитосферной плазме // *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде»: Сборник трудов – 2013.* – С. 161–165.

Магер П.Н., Костарев Д.В., Климушкин Д.Ю., Агипитов О.В. Дрейфово-компрессионные волны в магнитосфере // *Физика Солнца и околоземного космического пространства.* – 2013. – С. 166–169.

Костарев Д.В., Климушкин Д.Ю., Магер П.Н. Генерация дрейфово-компрессионных волн инверсным распределением частиц по энергиям в магнитосферной плазме // *X конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования».* Сборник трудов – 2014. – С. 61–68.

Костарев Д.В., Магер П.Н. Дрейфово-компрессионные волны распространяющиеся в направлении дрейфа энергичных электронов в магнитосфере // *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде»: Сборник трудов – 2017.* – С. 113–116.

### **Список литературы**

Веденов А.А., Велихов Е.П., Сагдеев Р.З. Устойчивость плазмы // *Успехи физических наук.* – 1961. – Т. LXXIII. – Вып. 4. – С. 701–766.

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

Кадоццев Б.Б. Коллективные явления в плазме. – М. : Наука, 1976. – 238 с.

Калсруд Р. Основы физики плазмы, в 2 тт. / Под ред. А. А. Галеева, Р. Судана – М. : Энергоатомиздат, 1983. – Т. 1. – С. 122–151.

Antonsen T.M., Lane B. Kinetic equations for low frequency instabilities in inhomogeneous plasma // *Phys. Fluids.* – 1981. – Vol. 23. – P. 1205–1214.

Allan W., Poulter E.M., Nielsen E. STARE observations of a Pc5 pulsation with large azimuthal wave number // *J. Geophys. Res.* – 1982. – Vol. 87, no. A8. – P. 6163–6172.

Barfield J.N., McPherron R.L. Statistical characteristics of storm-associated Pc5 micropulsations observed at the synchronous equatorial orbit // *J. Geophys. Res.* – 1972. – Vol. 77, no. 25. – P. 4720–4733.

Barfield J.N., McPherron R.L. Stormtime Pc 5 magnetic pulsations observed at synchronous orbit and their correlation with the partial ring current // *J. Geophys. Res.* – 1978. – Vol. 83, no. A2. – P. 739–743.

Catto P.J., Tang W.M., Baldwin D.E. Generalized gyrokinetics // *Plasma Phys.* – 1981. – Vol. 23, no. 7. – P. 639–650.

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

Chen L., Hasegawa A. Kinetic theory of geomagnetic pulsations, 1. Internal excitations by energetic particles // *J. Geophys. Res.* – 1991. – Vol. 96, no. A2. – P. 1503–1512.

Crabtree C., Horton W., Wong H.V., van Dam J.W. Bounce-averaged stability of compressional modes in geotail flux tubes // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108, no. A2. – P. 1084.

Eriksson P.T.I. Multi-Point Measurements of Ultra Low Frequency Waves in the Terrestrial Magnetosphere. – M.: Ph. D. Thesis, Royal Institute of Technology, 2007. 52 c.

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

Hasegawa A. Drift mirror instability in the magnetosphere // *The Physics of Fluids.* – 1969. – Vol. 12, no. 12. – P. 2642–2650.

Higuchi T., Kokubun S. Waveform and polarization of compressional Pc 5 waves at geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* – 1988. – Vol. 93, no. A12. – P. 14,433–14,443.

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

Howard T.A., Menk F.W. Ground observations of high-latitude Pc3-4 ULF waves // *J. Geophys. Res.* – 2005. – Vol. 110. – P. A04205.

Hugnes W.J., Southwood D.J., Mauk B., McPherron R.L., Barfiel J.N. Alfvén waves generated by an inverted plasma energy distribution // *Nature.* – 1978. – Vol. 275. – P. 43-44.

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

Klimushkin D.Y. Spatial structure of small-scale azimuthal hydrodynamic waves in an axisymmetric magnetospheric plasma with finite pressure // *Plasma Physics Rep.* – 1997. – Vol. 23, no. 10. – P. 858–871.

Klimushkin D.Y., Chen L. Eigenmode stability analysis of drift-mirror modes in nonuniform plasmas // *Annales Geophysicae.* – 2006. – Vol. 24. – P. 2435–2439.

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.

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

Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Theory of azimuthally small-scale Alfvén waves in an axisymmetric magnetosphere with small but finite plasma pressure // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, no. A11. – P. SMP 10–1–SMP 10–8.

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, no. A12. – P. 4915–4923.

Pokhotelov O.A., Balikhin M.A., Alleyne H.S.-C.K., Onishchenko O.G. Mirror instability with finite electron temperature effects // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105, no. A2. – P. 2393–2401.

Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Amata E. Drift anisotropy instability of a finite- $\beta$  magnetospheric plasma // *Planet. Space Sci.* – 1985. – Vol. 33, Issue 11. – P. 1229–1241.

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

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. – Vol. 123. – P. 9406–9419.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ № 194 от 3 декабря 2020 г.

Объем 16 стр. Тираж 150 экз.