

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения  
Российской академии наук

На правах рукописи  
УДК 533.951.3



**Михайлова Ольга Сергеевна**

**КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ УНЧ-ВОЛНЫ  
В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ**

Специальность 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы

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

Иркутск — 2017

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

**Научный руководитель:**

**Климушкин Дмитрий Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией

**Официальные оппоненты:**

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

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

**Ведущая организация:**

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

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки 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 Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Поляков В.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

На земную поверхность из космического пространства непрерывно падают электромагнитные волны ультразвуковой частоты (1 мГц — 5 Гц), называемые геомагнитными пульсациями. Уже более 60 лет геомагнитные пульсации являются предметом исследований. Геомагнитные пульсации являются эффективным средством мониторинга магнитосферы [Гульельми и Троицкая, 1973]. Благодаря им можно получить информацию о процессах, происходящих в магнитосфере. Магнитосфера — это локальная область в солнечном ветре, образуемая взаимодействием магнитного поля Земли с межпланетным магнитным полем. При взаимодействии с солнечным ветром на магнитопаузе и внутри магнитосферы в результате различных неустойчивостей возбуждаются гидромагнитные волны — геомагнитные пульсации.

Геомагнитные пульсации делятся на два больших класса: непрерывные (*pulsations continuous, Pc*) и иррегулярные, или импульсные (*pulsations irregulars, Pi*). В свою очередь, каждый класс делится на подклассы. 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) и *Pc6* (более 600 с). Импульсные делятся на *Pi1* (с периодом 1–40 с), *Pi2* (40–150 с), *Pi3* (более 150 с). Предметом исследования диссертационной работы являются пульсации в диапазоне *Pc1*.

Пульсации *Pc1* представляют собой квазисинусоидальные колебания с характерной модуляцией амплитуды, наблюдающиеся в виде отдельных волновых пакетов. Для этого типа пульсаций был введен специальный термин «жемчужины», поскольку их осциллограмма напоминает нитку жемчужного ожерелья. Амплитуды колебаний составляют 0,01 – 0,1 нТл. Пульсации *Pc1* часто регистрируются во время восстановительной фазы геомагнитной бури, когда происходит заполнение магнитосферы высокоэнергичными частицами. Это способствует развитию ионно-циклotronной неустойчивости МГД-колебаний, в результате которой и генерируются *Pc1*. «Жемчужины» также часто наблюдаются сразу после внезапного начала магнитной бури (SC — sudden commencement). В этом случае генерация *Pc1* связана с резким увеличением давления солнечного ветра и изменением параметров магнитосферной плазмы (плотности, концентрации ...). Иногда пульсации *Pc1* наблюдают за несколько часов до SC [Троицкая и Гульельми, 1969; Kangas et al., 1998; Клейменова, 2007]. Количество наблюдаемых пакетов *Pc1*, их характерная длительность и средняя частота увеличиваются с нарастанием интенсивности геомагнитной бури [Bortnik et al., 2008]. В частности, в [Fraser et al., 2010] при обработке 22 магнитных бурь во время основной фазы в 60 % случаев обнаружено наличие «жемчужин». Некоторые авторы указывают на время внезапного начала бури и конец ее восстановительной фазы как на наиболее вероятные временные интервалы появления *Pc1* [Posch et al., 2010]. Распределение вероятности появления «жемчужин» имеет пик в вечернем секторе магнитосферы в начале восстановительной фазы, а в утреннем секторе — в конце

этой фазы. Обнаружено, что размер области, в которой регистрируются пакеты «жемчужин», увеличивается с нарастанием интенсивности бури [Bortnik et al., 2008]. В магнитосопряженных точках жемчужины, как правило, регистрируются попеременно, то есть один и тот же волновой пакет регистрируется поочередно то в Южном, то в Северном полушарии.

Уже более 60 лет пульсации Pc1 являются предметом научного исследования [Гульельми, 1979; Беспалов, 1981; Kangas et al., 1998; Трахтенгерц и Демехов, 2002; Demekhov, 2007]. Однако до сих пор все еще остаются не вполне понятными механизм генерации пульсаций и образование формы волнового пакета [Guglielmi et al., 2001; Гульельми, 2015]. Нет модели, которая могла бы ответить на все вопросы о генерации, распространении «жемчужин», формировании волновых пакетов и периодов их повторения. Данная диссертационная работа является попыткой объяснить формирование волновых пакетов Pc1. Поскольку во время геомагнитных бурь в магнитосферной плазме появляется существенная примесь тяжелых ионов (в основном ионов кислорода), важная роль в проводимом исследовании отведена учету влияния этих ионов на распространение геомагнитных пульсаций.

Полученные в данной работе результаты могут быть экстраполированы и для описания УНЧ-волн, наблюдаемых в магнитосфере Меркурия, где в качестве тяжелых ионов выступают натрий и гелий [Glassmeier et al., 2003]. У Меркурия силовые линии короткие, поэтому периоды скачков колебаний волновых пакетов порядка нескольких секунд [Glassmeier et al., 2004]. Соответственно, собственные частоты колебаний сопоставимы с гирочастотой тяжелых ионов, например натрия. Гирочастота ионов натрия в магнитосфере Меркурия около 2.3 Гц, в то время как для кислорода в магнитосфере Земли она порядка 1 Гц. В 2018 г. планируется запуск космической миссии BepiColombo к Меркурию. При подлете к Меркурию от транспортного модуля отделятся две станции, одна из которых будет изучать поверхность планеты, а вторая — Mercury Magnetospheric Orbiter — будет исследовать его магнитосферу.

Поэтому тема диссертационной работы актуальна, а ее результаты дают существенный вклад в изучение УНЧ-колебаний как в магнитосфере Земли, так и в магнитосфере Меркурия.

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

Основной целью диссертационной работы является исследование влияния примеси тяжелых ионов на распространение короткопериодных УНЧ-волн диапазона Pc1 в магнитосферной плазме. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать продольную структуру квазиперечных УНЧ-волн диапазона Pc1 при учете в составе магнитосферной плазмы тяжелых ионов. Исследовать собственные моды резонатора для этих волн, формирующегося в приэкваториальной области магнитосферы, и прояснить их роль в формировании формы волновых пакетов Pc1.

2. Рассмотреть структуру областей прозрачности и непрозрачности, формирующих сложный магнитосферный резонатор. Изучить продольную структуру УНЧ-волн диапазона Pc1, локализованных вблизи ионосфера. Выяснить возможность генерации собственных мод МГД-колебаний в приионосферных областях прозрачности.

3. Исследовать в квазипродольном приближении пространственную структуру короткопериодных УНЧ-волн, локализованных вблизи плазмопаузы, принимая во внимание наличие в плазме примеси тяжелых ионов.

### **Научная новизна**

1. Впервые аналитически исследована продольная структура и спектр квазипоперечных УНЧ-колебаний диапазона Pc1 при наличии примеси тяжелых ионов в магнитосферной плазме. Определены точки отражения волны при произвольных значениях компонент волнового вектора.

2. Впервые проведено аналитическое исследование структуры прилегающих к ионосфере областей прозрачности и непрозрачности для квазипоперечных Pc1, учитывающее наличие тяжелых ионов в плазме.

3. Впервые с учетом примеси тяжелых ионов в магнитосферной плазме изучена пространственная структура и спектр УНЧ-волн диапазона Pc1, локализованных поперек магнитных оболочек вблизи плазмопаузы.

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

Проведено аналитическое исследование продольной и поперечной структур короткопериодных УНЧ-колебаний в магнитосферной плазме с учётом примеси тяжелых ионов. Показана возможность формирования приэкваториального резонатора, в котором возбуждается одновременно большое количество собственных гармоник. В направлении поперек магнитных оболочек волна локализована в окрестности плазмопаузы. Это позволяет аналитически описать полную структуру отдельных гармоник и формирование ими волнового пакета Pc1, определить спектр собственных частот рассматриваемого резонатора. Эти собственные гармоники формируют сложную картину биений, имеющих характерную форму «жемчужин». Проведено аналитическое исследование приионосферных областей прозрачности и областей непрозрачности. Показано, что формирование собственных колебаний в приионосферном резонаторе невозможно.

Определены местоположения областей прозрачности, в которых могут сформироваться пакеты Pc1 и где они могут быть зарегистрированы космическими аппаратами. Представленные в работе результаты являются обобщением результатов более ранних работ, посвященных аналогичным исследованиям. Они получены на основе объединения разных подходов к решению поставленных задач. Модель экваториального резонатора — это шаг к построению общей модели формирования и распространения волн Pc1 в магнитосфере, а также к лучшему пониманию процессов, протекающих в околоземном космическом пространстве. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы также для исследования УНЧ-волн в магнитосферах других планет Солнечной системы, обладающих магнитосферой (например, Меркурия).

## **Достоверность результатов**

Достоверность результатов, представленных в данной диссертационной работе, обусловлена использованием строгих методов математического исследования. Результаты работы согласуются с результатами предшествующих исследований, а в некоторых предельных случаях они описываются известными аналитическими выражениями. Численные оценки частот колебаний  $Pc1$  и местоположения областей прозрачности на силовой линии, полученные в данной диссертационной работе, согласуются с данными наблюдений, полученных с помощью космических аппаратов.

## **Личный вклад автора**

Решение задач, поставленных и выполненных в данной диссертационной работе, получено лично автором либо при его непосредственном участии. Все аналитические выкладки и численные оценки выполнены докторантом лично. Таблицы, графики и рисунки, за исключением тех, которые отсылают к определенным источникам, выполнены автором диссертации. Автор принимала участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов, подготовке статей для публикации и представляла устные и стеновые доклады на конференциях.

## **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- 18th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, (Kyiv, Ukraine, 2011).
- БШФФ-2011. XII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», (Иркутск, Россия, 2011).
- First European School on “Fundamental Processes in Space Weather: a Challenge in Numerical Modeling” (Spineto, Toskana, Italy, 2012).
- 12-я Украинская конференция по космическим исследованиям, Евпатория (Крым, Украина, 2012).
- X Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, Россия, 2013).
- ILWS Workshop on “Space Weather Research with Space and Ground-Based Observations” (Irkutsk, Russia, 2013).
- БШФФ-2013. XIII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, Россия, 2013).
- Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвящённая 100-летию со дня рождения В.Е. Степанова (Иркутск, Россия, 2013).
- Научные семинары в ИФЗ РАН и ИСЗФ СО РАН.

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

1. Показано, что при наличии в плазме магнитосферы существенной примеси ионов гелия или кислорода вблизи геомагнитного экватора формируется резонатор для квазипоперечных альфеновских волн со спектром собственных частот в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc1.

2. Установлено, что в присутствии тяжелых ионов вблизи ионосферы для квазипоперечных альфеновских волн появляются дополнительные области прозрачности, которые ограничены высокопроводящей ионосферой и сингулярными точками поворота.

3. На основе анализа пространственной структуры квазипродольных ионно-циклотронных волн показано, что продольный и поперечный размеры резонатора для колебаний Pc1, а также его собственные частоты определяются относительной плотностью тяжелых ионов в магнитосферной плазме.

## **Публикации**

Материалы, используемые в диссертации, опубликованы в 9 печатных работах, из них 3 статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и ADS и рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 111 страниц, включая 36 рисунков, 3 таблицы. Список литературы содержит 120 наименований.

## **Краткое содержание работы**

**Введение** содержит основные сведения о магнитосфере, обзор наблюдений геомагнитных пульсаций (ультразвуковых (УНЧ) волн), а также теоретическое описание магнитогидродинамических (МГД) волн и процессов, приводящих к их генерации. Рассмотрены виды МГД-колебаний, механизмы их генерации и распространения. Представлен обзор работ, в которых исследованы геомагнитные пульсации Pc1. Дано описание нескольких моделей формирования волновых пакетов Pc1: модель волнового пакета в неограниченной плазме [Троицкая, Гульельми, 1969]; модуляция амплитуды колебаний Pc1 длиннопериодными пульсациями Pc3–4 [Mursula, 2007]; поперечный резонатор для Pc1 вблизи плазмопаузы [Dmitrienko, Mazur, 1992]; продольный резонатор для пульсаций Pc1, формирующийся в приэкваториальной магнитосфере при наличии тяжелых ионов в магнитосферной плазме [Guglielmi et al., 2000, 2001]. Все эти модели, за исключением модели амплитудной модуляции длиннопериодными пульсациями, описывают квазипродольные альфеновские волны. Также во введении описаны цели диссертационной работы, научная новизна, актуальность и значимость получаемых результатов.

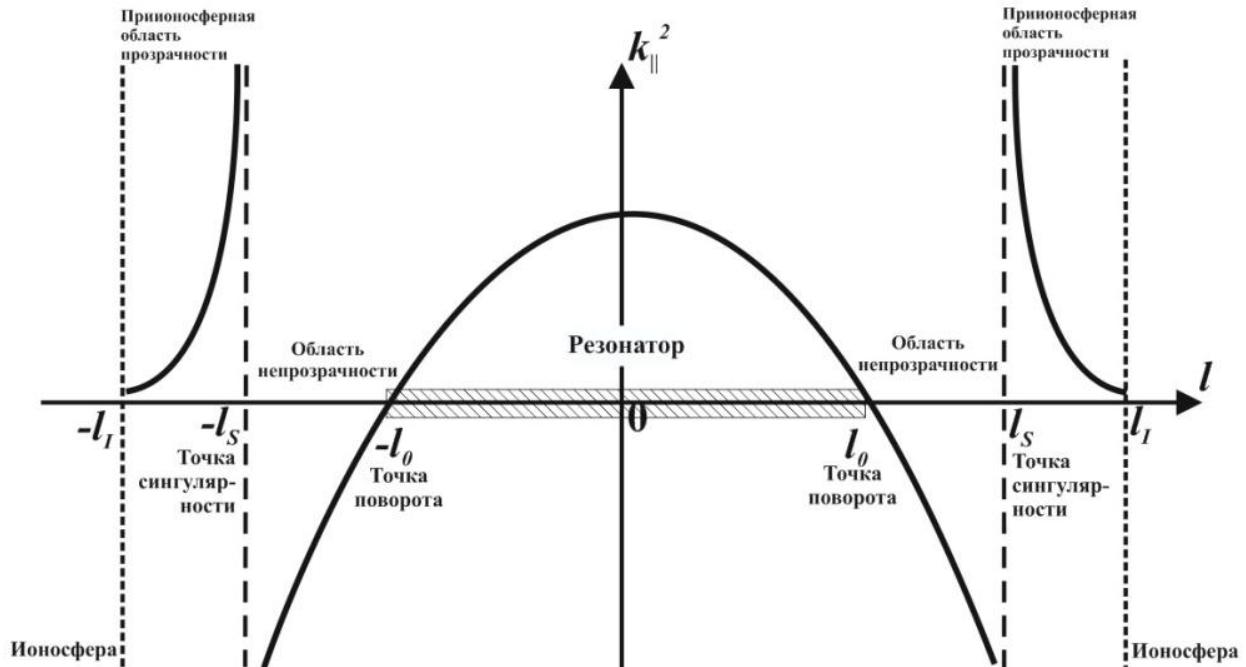
В **главе 1** исследована продольная структура квазипоперечных УНЧ-волн диапазона Pc1. Дано обоснование использования квазипоперечного прибли-

жения. Спутниковые наблюдения пульсаций Pc1 показали, что колебания локализованы в магнитосфере на достаточно узких пространственных масштабах. Локализация колебаний по широте составляет от десятков до  $\sim 100$  км [Engebretson et al., 2008; Pilipenko et al., 2012]. Поэтому использование для них квазипоперечного приближения оправданно и требует специального рассмотрения. В разделе 1.1 для исследования продольной структуры УНЧ-волн получены основные уравнения в криволинейной системе координат, связанной с силовыми линиями геомагнитного поля. Рассматривается распространение альфвеновских волн в холодной неоднородной плазме с примесью тяжелых ионов. Предполагается, что частота волны больше или порядка частоты тяжелых ионов. Электрическое поле представляется в виде разложения, использующего скалярный потенциал  $\Phi$  и продольную компоненту векторного потенциала —  $\Psi$ . Потенциал  $\Phi$  описывает поле альфвеновской волны, а компонента  $\Psi$  — поле быстрого магнитного звука (БМЗ). На потенциалы  $\Phi$  и  $\Psi$  получена система из двух связанных уравнений для альфвеновской и БМЗ-волн.

В разделе 1.2 обосновано существование областей прозрачности и непрозрачности для рассматриваемых волн в направлении вдоль силовых линий геомагнитного поля. Рассмотрена тороидально-поляризованный альфвеновская волна (для полоидально-поляризованной волны результаты аналогичны). Предполагается аксиальная симметрия модели среды, в которой азимутальную структуру волнового поля можно искать в виде разложения по гармоникам с азимутальными волновыми числами  $m=0, 1, 2, \dots$ . В качестве граничных условий вдоль магнитных силовых линий используется приближение идеально проводящей ионосферы в точках ее пересечения силовыми линиями геомагнитного поля. Для вывода уравнения, описывающего структуру волны, использовано ВКБ-приближение по радиальной координате, а для нахождения продольной компоненты волнового вектора — ВКБ-приближение по продольной координате. Исследование зависимости продольной компоненты волнового вектора от продольной координаты показало, что вблизи геомагнитного экватора образуется резонатор, ограниченный двумя точками поворота  $\pm l_0$ , расположенными симметрично относительно экватора. Резонатор граничит с двумя областями непрозрачности, за которыми расположены области прозрачности, простирающиеся от сингулярных точек поворота до ионосферы Северного или Южного полушарий (см. рис. 1).

В разделе 1.3 подробно рассмотрен приэкваториальный резонатор для альфвеновских волн. Для нахождения спектра собственных частот этого резонатора использовано правило квантования Бора—Зоммерфельда. Оказалось, что спектр собственных частот достаточно плотный: разность между двумя соседними частотами мала по сравнению с величиной самих частот. Поскольку в резонаторе может одновременно возбуждаться множество гармоник, это приводит к формированию биений, которые по своей форме соответствуют форме пульсаций Pc1. Приведены численные оценки для координат обычной и сингулярной точек отражения, а также для частоты основной гармоники резонатора. Спектр собственных частот колебаний этого резонатора совпадает с диапазоном пульсаций Pc1.

В разделе 1.4 исследованы собственные моды экваториального резонатора при произвольных значениях компонент их волнового вектора. Показано, что основной вклад в определение собственных частот из дисперсионного уравнения вносит слагаемое, описывающее колебания в квазипоперечном приближении.



*Рис. 1.* Квадрат продольной компоненты волнового вектора как функция продольной координаты

В главе 2 исследованы резонаторы для альфеновских волн, расположенные в областях прозрачности, прилегающих к ионосфере. Основной задачей данной главы является выяснение того, возможно ли в приноосферной области прозрачности существование собственных колебаний и оказывают ли эти колебания влияние на колебания в приэкваториальном резонаторе.

В разделе 2.1 в квазипоперечном приближении исследована продольная структура УНЧ-волн в области прозрачности, локализованной вблизи ионосферы. Рассмотрено приближение идеально проводящей ионосферы, от которой волна полностью отражается. Для исследования структуры колебаний использовано уравнение для квазипоперечных альфеновских волн. Вдали от точки сингулярности решение ищется в ВКБ-приближении, а вблизи нее решение выражается через функции Бесселя. Структура колебаний в приноосферной области схематично показана на рис. 2.

Раздел 2.2 содержит аналогичное рассмотрение УНЧ-волны в случае, когда ионосфера не является идеально проводящей средой и волна затухает. В этом случае волна может проникнуть сквозь ионосферу и регистрироваться наземными станциями. Структура волны при таких граничных условиях показана на рис. 2 пунктирной линией. В обоих случаях амплитуда колебаний в точке сингулярности регуляризована учетом их диссипации в ионосфере.

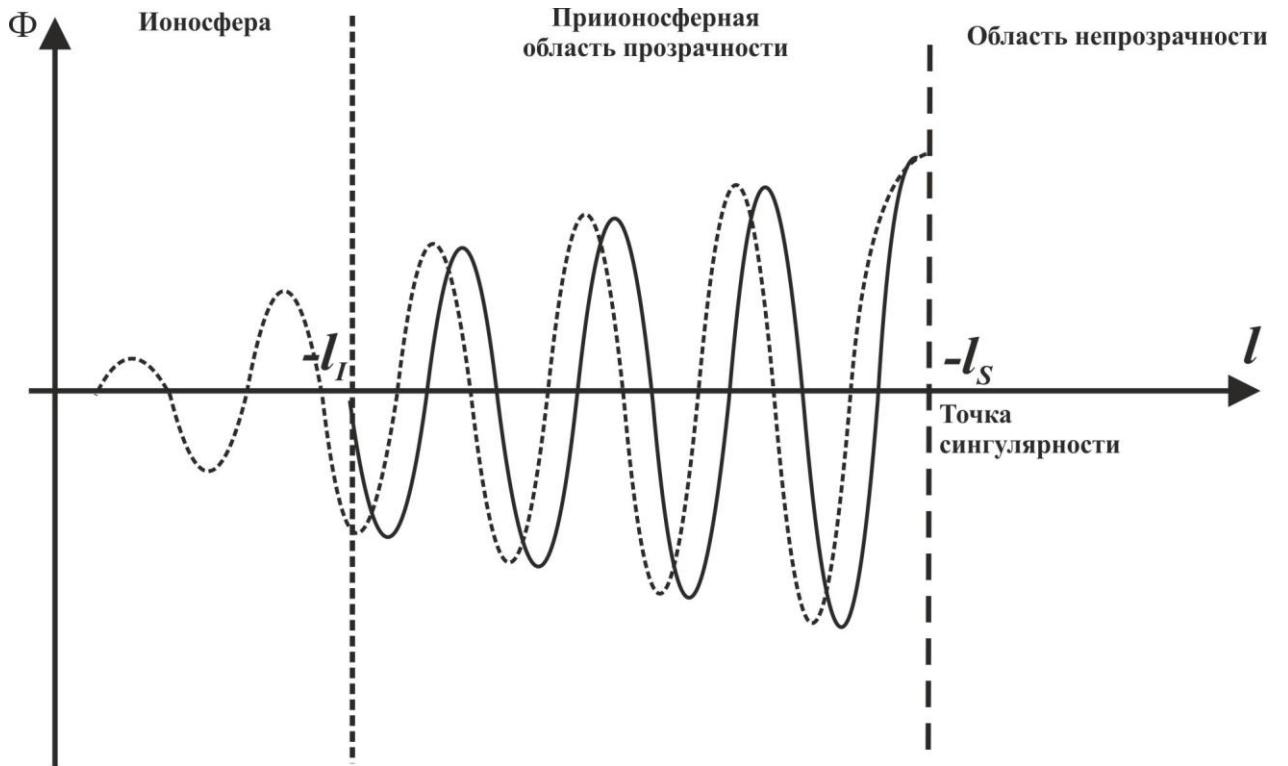


Рис. 2. Зависимость волновой функции от продольной координаты в приионосферной области прозрачности. Показаны решения волнового уравнения при разных граничных условиях: сплошная линия — приближение идеально проводящей ионосферы, пунктирной линии — ионосфера с конечной проводимостью

Целью раздела 2.3 является исследование структуры волны в области непрозрачности. Из результатов главы 1 следует, что в области непрозрачности существует спадающее по амплитуде решение. Это означает, что часть энергии волны может проникать сквозь область непрозрачности в область прозрачности, расположенную вблизи ионосферы. Эта волна может служить источником колебаний в приионосферной области. Проведенные расчеты позволяют ответить на вопрос, существует ли такое спадающее решение со стороны приионосферной области. Решение волнового уравнения в области непрозрачности находится при аналитическом продолжении решения через точку сингулярности с последующей его сшивкой с ВКБ-решением в области прозрачности. В случае идеально проводящей ионосферы, как и в случае ионосферы с конечной проводимостью, имеются два линейно-независимых решения, одно из которых растущее, а второе — спадающее.

Для волны, проникшей через область непрозрачности, имеется точка сингулярности, где ее амплитуда многократно возрастает. При этом в приионосферной области прозрачности устанавливаются вынужденные колебания. В разделе 2.4 рассмотрена задача о поглощении части энергии этих колебаний в точке сингулярности. Для того чтобы исследовать потери энергии, вычисляется средний поток вектора Пойнтинга (в области непрозрачности он равен нулю). В области прозрачности за сингулярной точкой поворота поток вектора Пойнтинга положителен. Это означает, что полученное решение

описывает волну, падающую на сингулярную точку поворота и полностью поглощаемую в ее окрестности.

В главе 3 исследована глобальная пространственная структура УНЧ-колебаний вблизи плазмопаузы с учетом наличия примеси тяжелых ионов в плазме магнитосферы. На плазмопаузе радиальный профиль альфеновской скорости имеет локальный минимум вследствие резкого изменения параметров плазмы. В этой области для волн  $Pc1$  может образоваться резонатор в радиальном направлении [Dmitrienko, Mazur, 1992]. Наличие тяжелых ионов в плазме приводит к образованию областей непрозрачности и точек поворота на силовой линии. Таким образом, волна оказывается запертой в приэкваториальном резонаторе. В данной главе рассмотрен классический случай квазипродольного распространения  $Pc1$ , как это сделано и в работах [Guglielmi et al., 2000, 2001]. Поскольку рассматриваемые волны локализованы в резонаторе в окрестности плазмопаузы, малость поперечной компоненты волнового вектора обусловлена в данном случае малостью как его радиальной компоненты [Dmitrienko, Mazur, 1992], так и азимутального волнового числа (рассматриваются тороидально-поляризованные волны).

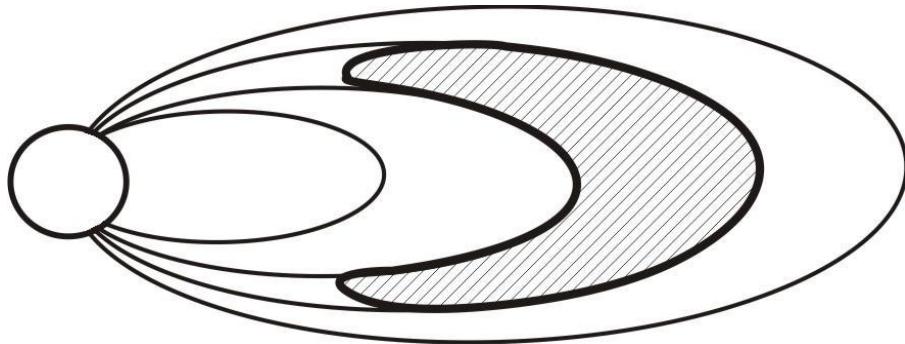
В разделе 3.1 получена система уравнений для УНЧ-колебаний в плазме с примесью тяжелых ионов. Граничные условия для рассматриваемых волн определяются из того, что точки их поворота разделяют области прозрачности и непрозрачности. Использовано ВКБ-приближение по продольной координате. Получена система уравнений, которая совместно с граничными условиями по радиальной координате представляет собой задачу на собственные значения продольной компоненты волнового вектора:  $k_3=k_3(x^3)$ . Из этой системы уравнений, содержащей производные только по радиальной координате, находится поперечная структура волны.

В разделе 3.2 рассмотрена поперечная структура УНЧ-волн на плазмопаузе. Вблизи плазмопаузы радиальный профиль скорости Альфвена имеет локальный минимум. Для волн, локализованных вблизи этого минимума, использовано параболическое представление для диагональной компоненты тензора их диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\perp}$ . Получено волновое уравнение на поперечную структуру волны. Найдены выражения для определения точек поворота. Они расположены по двум сторонам от локального минимума  $v_A(x^1)$  на равном от него расстоянии. Это означает, что поперечный резонатор можно рассматривать в виде потенциальной ямы аналогично тому, как это делается в квантовой механике.

Раздел 3.3 содержит решение волнового уравнения, имеющего вид уравнения Шредингера с потенциальной ямой, описывающей поперечную структуру рассматриваемых колебаний. Потенциальная яма может быть двух видов: глубокая и мелкая. В глубокой яме имеется множество дискретных уровней энергии, в мелкой — только один [Ландау, Лифшиц, 2004]. Для различных значений недиагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости ( $\eta$ ) волновое уравнение на поперечную структуру сводится к одному из этих случаев. Если  $\eta$  пренебрежимо мало, как в холодной однородной плазме, то волновое уравнение сводится к уравнению для функций пара-

бolicеского цилиндра (мелкая яма). Решение такого уравнения выражается через функции Уиттекера и имеет только одно собственное значение, то есть в случае мелкой ямы в волноводе возбуждается только одна мода собственных колебаний. В случае достаточно больших  $\eta$  волновое уравнение описывает глубокую потенциальную яму. Собственные моды в этом случае описываются полиномами Эрмита с дискретным набором собственных значений.

В разделе 3.4 исследована продольная структура УНЧ-волн на плазмопаузе. Для этого использован следующий порядок теории возмущений. Как и в главе 1, для нахождения частотного спектра использовано правило квантования Бора — Зоммерфельда. Получен спектр частот, возбуждаемых в продольном резонаторе, локализованном в окрестности плазмопаузы. Частотный спектр возбуждаемых в резонаторе волн квантован. Частота волны зависит как от поперечного ( $n$ ), так и от продольного ( $N$ ) волнового числа. Все гармоники в резонаторе возбуждаются одновременно, в результате чего возникают биения, создавая волновые формы, похожие на форму «жемчужин» Рс1. Найдены координаты точек поворота этих волн на силовой линии. Сделаны оценки собственной частоты для основной гармоники колебаний с волновыми числами  $N=0$  и  $n=0$ . Частота нулевой гармоники имеет значение порядка 2–3 Гц, а координаты точек ее поворота находятся на расстоянии  $l_0=\pm 0.77 R_E$  от экватора. Поперек магнитных оболочек полуширина резонатора составляет порядка 1000 км. Волна заперта в достаточно узкой серповидной области вблизи экваториальной поверхности (см. рис. 3).



*Rис. 3. Область, в которой заперта волна*

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. А. Показано, что в магнитосферной плазме с примесью тяжелых ионов в экваториальной части силовой линии формируется резонатор для квазипоперечной альфвеновской волны.

Б. Найден спектр собственных частот этого резонатора. В резонаторе одновременно возбуждается большое число собственных гармоник, которые формируют биения, характерные для «жемчужин» Рс1.

В. Резонатор ограничен областями непрозрачности, размер которых зависит от концентрации тяжелых ионов: чем выше концентрация тяжелых ионов, тем шире область непрозрачности.

2. А. Установлено, что в присутствии тяжелых ионов вблизи ионосферы появляются дополнительные области прозрачности для квазипоперечной альфвеновской волны.

Б. Одним из источников колебаний в приионосферном резонаторе являются колебания, возбуждаемые в приэкваториальном резонаторе. Часть энергии этих волн может проникать сквозь области непрозрачности в приионосферные области прозрачности, где устанавливаются вынужденные колебания. Исследована продольная структура этих колебаний.

3. А. Показано, что при учете тяжелых ионов в плазме структура ионно-циклотронных волн в квазипротодольном случае определяется как продольным, так и поперечным квантовыми числами. Волна заперта в резонаторе как вдоль силовых линий в области магнитного экватора, так и в направлении поперек магнитных оболочек вблизи плазмопаузы.

Б. Продольный и поперечный размеры резонатора определяются плотностью тяжелых ионов. В резонаторе одновременно возбуждаются множество собственных гармоник колебаний, создающих волновые формы, похожие на форму «жемчужин» Pc1. Определен спектр частот собственных гармоник этого резонатора.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Klimushkin, D.Yu. Parallel structure of Pc1 ULF oscillations in multi-ion magnetospheric plasma at finite ion gyrofrequency / Dmitri Yu. Klimushkin, Pavel N. Mager, Olga S. Marilovtseva // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2010. — Vol. 72. — P. 1327–1332.

Mikhailova, O.S. Pc1-pulsations: the parallel structure in the plasma with the admixture of the heavy ions / Olga Mikhailova, D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2012. — Vol. 2. — P. 88–90.

Mikhailova, O.S. The spatial structure of ULF-waves in the equatorial resonator localized at the plasmapause with the admixture of the heavy ions / Olga S. Mikhailova // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2014. — Vol. 108. — P. 10–16.

### Прочие публикации

Мариловцева, О.С. Ультранизкочастотные колебания в мультикомпонентной космической плазме / О.С. Мариловцева, Д.Ю. Климушкин // Вестник Иркутского университета. — 2009. — С. 310–311.

Мариловцева, О.С. Приэкваториальный резонатор для УНЧ-колебаний с учетом примеси тяжелых ионов в магнитосфере / О.С. Мариловцева, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер // Солнечно-земная физика. — 2010. — Вып. 16. — С. 82–87.

Михайлова, О.С. Область локализации резонатора для УНЧ-волн при наличии в плазме тяжелых ионов как функция поперечного волнового вектора

ра / О.С. Михайлова, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер // Сборник трудов XII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». — Иркутск, 2011. — С. 233–235.

**Михайлова, О.С.** О возможности локализации волн Pc1 вблизи ионосферах с учетом наличия тяжелых ионов в магнитосфере / О.С. Михайлова // Солнечно-земная физика. — 2011. — Вып. 19. — С. 83–87.

**Михайлова, О.С.** Исследование структуры УНЧ-колебаний вблизи плазмопаузы при наличии в магнитосферной плазме тяжелых ионов / О.С. Михайлова // Солнечно-земная физика. — 2013. — Вып. 23. — С. 84–90.

**Михайлова, О.С.** Система волновых уравнений для МГД-волн с применением тяжелых ионов и конечным давлением / О.С. Михайлова, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер // Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова. — Иркутск, 2013. — С. 175–177.

В первых публикациях автор использует фамилию Мариловцева, которая впоследствии была изменена на фамилию Михайлова, в связи со вступлением в брак.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Беспалов П.А. Самомодуляция излучения плазменного циклотронного мазера // Письма в ЖЭТФ. — 1981. — Т. 33, № 4. — С. 192–195.

Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. — М.: Наука, 1979. — 139 с.

Гульельми А.В. Три нерешенные проблемы физики магнитосферных волн Pc1 // Геофизические исследования. — 2015. — Т. 16. — С. 63–72.

Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации // Модель космоса. — Т. 1. — М.: КДУ, 2007. — С. 511–627.

Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Курс теоретической физики. Квантовая механика (нерелятивистская теория). — М.: Физматлит, 2004. — 800 с.

Трахтенгерц В.Ю., Демехов А.Г. Космические циклотронные мазеры [Электронный ресурс] // Природа. — 2002. — № 4. — Режим доступа: [www.kosmofizika.ru/popular/mazer.htm](http://www.kosmofizika.ru/popular/mazer.htm) (дата обращения: 15 августа 2017 г.).

Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физических наук. — 1969. — Т. 97, № 3. — С. 454–494.

Bortnik J., Cutler J.W., Dunson C., et al. Characteristics of low-latitude Pc1 pulsations during geomagnetic storms // Journal of Geophysical Research. — 2008. — Vol. 113, no. A4. — AO4201. — DOI: 10.1029/2007JA012867.

Demekhov A.G. Recent progress in understanding Pc1 pearl formation // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2007. — Vol. 69. — P. 1599–1774.

Dmitrienko I.S., Mazur V.A. The spatial structure of quasicircular Alfvén modes of waveguide at the plasmapause — Interpretation of Pc1 pulsations // Planetary Space Science. — 1992. — Vol. 40. — P. 139–148.

Engebretson M.J., Posch J.L., Westerman A.M., et al. Temporal and spatial characteristics of Pc1 waves observed by ST5 // Journal of Geophysical Research. — 2008. — Vol. 113. — A07206.

Fraser B.J., McPherron R.L. Pc 1–2 magnetic pulsation spectra and heavy ion effects at synchronous orbit: ATS 6 results // Journal of Geophysical Research. — 1982. — Vol. 87, № A6. — P. 4560–4566.

Glassmeier K.-H., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Concerning ULF pulsations in Mercury's magnetosphere // Geophysical Research Letters. — 2003. — Vol. 30, no. 18. — P. 1928. — DOI: 10.1029/2003G017175.

Glassmeier K.-H., Klimushkin D.Yu., Othmer C., Mager P.N. ULF waves at Mercury: Earth, the giants, and their little brother compared // Advances in Space Research. — 2004. — Vol. 33. — P. 1875–1883.

Guglielmi A.V., Potapov A.S., Russell C.T. The ion cyclotron resonator in the magnetosphere // JETP Letters. — 2000. — Vol. 72, no. 6. — P. 298–300.

Guglielmi A., Kangas J., Potapov A. Quasiperiodic modulation of the Pc1 geomagnetic pulsations: an unsettled problem // Journal of Geophysical Research. — 2001. — Vol. 106, no. A11. — P. 25847–25855.

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of shortperiodic magnetic pulsations // Space Science Reviews. — 1998. — Vol. 93. — P. 435–512.

Mursula K. Satellite observations of Pc1 pearl waves: the changing paradigm // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2007. — Vol. 69, no. 14. — P. 1623–1634.

Pilipenko V.A., Polozova T.L., Engebretson M.J. Space-time structure of ion-cyclotron waves in the topside ionosphere as observed onboard the ST-5 satellites // Cosmic Research. — 2012. — Vol. 50, no. 5. — P. 329–339.

Posch J.L., Engebretson M.J., Murphy M.T., et al. Probing the relationship between electromagnetic ion cyclotron waves and plasmaspheric plumes near geosynchronous orbit // Journal of Geophysical Research. — 2010. — Vol. 115, no. A11. — A11205. — DOI: 10.1029/2010JA015446.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН  
Заказ № 177 от 2017 г.  
Объем 16 с. Тираж 150 экз.