

На правах рукописи

ЗУДИН Илья Юрьевич

**ЛАБОРАТОРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА
В НЕСТАЦИОНАРНОЙ И НЕОДНОРОДНОЙ
МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ**

01.04.08 – физика плазмы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: Гущин Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Официальные оппоненты Шкляр Давид Рувимович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

Котик Дмитрий Самойлович, кандидат физико-математических наук, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»

Защита состоится «21» декабря 2020 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 при ИПФ РАН (603950 г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФБГНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Автореферат разослан «10» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Свистовые волны, возбуждаемые в полосе крайне низких и очень низких частот (КНЧ и ОНЧ), играют важную роль в различных процессах в околоземной плазме, могут служить инструментом активного воздействия на геофизическую среду, использоваться для радиосвязи. Источниками свистовых волн являются наземные передатчики [1, 2], молниевые разряды [3], а также различные неустойчивости, развивающиеся при участии энергичных частиц радиационных поясов Земли [4–6]. Искусственные волны свистового диапазона могут возбуждаться с борта космических аппаратов, использующих антенны длиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров [7, 8]. Естественные волны свистового диапазона представляют собой шумовые и дискретные (узкополосные) эмиссии, в том числе – с очень высокой интенсивностью [4, 9, 10]. Как естественные, так и искусственные волны свистового диапазона используются для диагностики околоземной плазмы [11, 12], исследования радиационных поясов и активного воздействия на них [13, 14].

В процессе распространения через околоземную плазму свистовые волны подвержены влиянию нестационарных и неоднородных в пространстве вариаций параметров среды. Возмущения околоземной плазмы могут быть обусловлены как естественными причинами, так и активным волновым воздействием на ионосферу, в первую очередь – мощными наземными станциями, включая специализированные коротковолновые (КВ) стенды для нагрева ионосферы [15]. Нестационарные возмущения околоземной плазмы обогащают спектр квазимонохроматических свистовых волн [16–18]. Неоднородности плазмы, в свою очередь, изменяют трассы распространения свистовых волн, модулируют их пространственную структуру, а также играют роль волноводных каналов [19, 20].

Нестационарные возмущения плазмы могут возникать при взаимодействии интенсивных волн на общей трассе распространения. Для объяснения эффектов взаимодействия свистовых волн в околоземной плазме ранее предлагались резонансные механизмы, подразумевающие выполнение условий синхронизма [21]. В то же время, нерезонансные параметрические явления [22], не требующие для своего развития выполнения строгих условий на частоты и длины взаимодействующих волн, и благодаря этому способные обеспечивать преобразование спектра в широкой полосе частот, могут играть важную роль. Понимание механизмов нелинейности важно для интерпретации результатов натурных экспериментов со свистовыми волнами с целью разделения эффектов взаимодействия типа «волна – волна» и «волна – частица». На сегодняшний день остается не до конца исследованным вопрос об эффективности взаимодействия свистовых волн на общих трассах распространения и механизмах, ответственных за генерацию сигналов комбинационных частот.

В активных ионосферных экспериментах, выполняемых с использованием мощных наземных передатчиков, возможно формирование неоднородных структур околослойной плазмы, которые могут служить волноводными каналами (или дактами) для волн свистового диапазона. Создание искусственных ионосферных дактов за счет высокочастотного нагрева ионосферы [23] может, в частности, способствовать выходу КНЧ-ОНЧ сигналов из ионосферы в магнитосферу. Данное явление наблюдалось в экспериментах, выполненных с использованием нагревных стенов EISCAT (Норвегия) [24], «Сура» (Россия) [25], HAARP (США) [26]. Результаты недавних исследований указывают на то, что искусственные дакты, возникающие при нагреве ионосферы, имеют сложную внутреннюю структуру. Так, прямые спутниковые измерения демонстрируют существование внутри дактов неоднородностей концентрации плазмы, вытянутых вдоль геомагнитного поля, с поперечными размерами порядка 10 км [27]. Кроме того, косвенные данные, полученные по рассеянию ОНЧ волн на неоднородностях, а также радарные измерения свидетельствуют о существовании внутри крупномасштабных дактов сильно вытянутых мелкомасштабных неоднородностей с поперечными размерами от 10 м до 1 км [19, 28]. Имеющиеся модели описывают, в основном, распространение свистовых волн вдоль неоднородностей с относительно простым поперечным профилем. Влияние множественных неоднородностей концентрации с различными поперечными масштабами, образующих вторичную ионосферную турбулентность, на распространение свистовых волн является открытым вопросом. Решение данной проблемы важно как для фундаментальной науки, так и для приложений, связанных с радиосвязью и развитием новых методов волновой диагностики ионосферы.

Проведение натурных исследований сопряжено со значительными организационно-финансовыми затратами на обеспечение работы специальных стенов для активного воздействия на околослойную плазму, функционирование сети наблюдательных пунктов, разработку и запуск космических миссий. Это обстоятельство делает оправданным лабораторное моделирование волновых процессов, производимое на специализированных крупномасштабных плазменных стенох [29]. К достоинствам лабораторного эксперимента относится возможность использования широкого арсенала современных методов диагностики плазмы, многократного воспроизведения исследуемого явления при целенаправленном варьировании условий его протекания. Результаты лабораторных и космических экспериментов могут быть сопоставлены друг с другом на основании преобразований подобия [30]. Другим подходом к исследованию эффектов, возникающих в околослойной плазме, является численное моделирование, получившее широкое распространение благодаря непрерывному развитию вычислительной техники. В части изучения распространения свистовых волн, разрабатываемые в настоящее время численные модели дополняют аналитический подход [31–33], особенно – при решении задач взаимодействия низкочастотного излучения с неоднородными плазменными

структурами [20,27]. Сочетание лабораторного и численного моделирования способствует верификации разрабатываемых моделей различного уровня. Комбинированный подход может эффективно применяться для решения задач распространения электромагнитных волн в нестационарной и неоднородной плазме.

Цели и задачи диссертации

Цель диссертационной работы – исследование методами лабораторного и численного моделирования эффектов, возникающих при распространении свистовых волн в магнитоактивной плазме с нестационарными возмущениями параметров и при наличии групп вытянутых вдоль магнитного поля неоднородностей концентрации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд следующих задач:

- выполнить на лабораторном плазменном стенде «Крот» экспериментальное исследование эффектов параметрического взаимодействия свистовых волн на общей трассе распространения; провести теоретический анализ полученных результатов;

- разработать и реализовать численный алгоритм для решения задачи о взаимодействии волн свистового диапазона с системами вытянутых вдоль внешнего магнитного поля неоднородностей концентрации с различными поперечными масштабами;

- выполнить численное моделирование эффектов взаимодействия свистовых волн с регулярными и случайными неоднородностями с повышенной и пониженной относительно фонового значения концентрацией плазмы в условиях, соответствующих параметрам лабораторного и активного ионосферного экспериментов;

- разработать методику создания в лабораторной плазме систем вытянутых вдоль магнитного поля неоднородностей концентрации для лабораторного моделирования ионосферных эффектов, и выполнить эксперименты по взаимодействию свистовых волн с группами плазменных неоднородностей в режиме волноводного захвата и распространения.

Научная новизна

Полученные в диссертационном исследовании результаты оригинальны и новы, что подтверждается их публикацией в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах.

Впервые на большой плазменной установке экспериментально исследовано взаимодействие интенсивных свистовых волн, проявляющееся в их кроссмодуляции, за счет возмущений концентрации плазмы и генерации низкочастотных нелинейных токов.

Разработан и реализован оригинальный алгоритм моделирования распространения свистовых волн в неоднородной плазме, основанный на методе конечных разностей во временной области (FDTD). Данный алгоритм использован для моделирования распространения свистовых волн в присутствии систем мелкомасштабных неоднородностей концентрации в условиях, характерных для натуральных ионосферных и лабораторных экспериментов, включая активный эксперимент с использованием высокочастотного нагревного стэнда «Сура», низкочастотного наземного передатчика и спутника DEMETER.

Обнаружены и исследованы новые режимы волноводного распространения свистовых волн вдоль систем вытянутых неоднородностей с повышенной и пониженной концентрацией магнитоактивной плазмы. Дана качественная и количественная интерпретация полученных результатов на основе аналитических решений задач о распространении волн вдоль цилиндрических (в трехмерной геометрии) и плоских (в двумерной геометрии) неоднородностей плазмы. Предложена оригинальная методика создания в лабораторных экспериментах систем неоднородностей с пониженной концентрацией плазмы за счет ее локального высокочастотного нагрева с помощью линейки компактных антенн. Впервые в лаборатории показано распространение свистовых волн вдоль системы неоднородностей концентрации в режиме связанных волноводов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии имеющихся и разработке новых моделей взаимодействия свистовых волн с плазмой. В частности, на основе результатов лабораторных экспериментов предложен механизм нелинейного взаимодействия свистовых волн на общей трассе распространения. По результатам численного моделирования установлены новые режимы волноводного каналирования свистовых волн системами мелкомасштабных неоднородностей магнитоактивной плазмы. В зависимости от размера неоднородностей и масштабов локализации волноводных мод неоднородностей, рассматриваемых по отдельности, система может образовывать совокупность независимых плазменных волноводов; волноводов, обменивающихся энергией за счет перекрытия мод, либо образовывать единый волновод, электродинамические свойства которого не зависят от деталей его мелкомасштабной структуры.

Практическая значимость работы состоит в возможности прямого использования полученных результатов для интерпретации результатов активных экспериментов по прохождению КНЧ-ОНЧ излучения через ионосферу в присутствие искусственных ионосферных дактов плотности [19, 26], в том числе оценки профиля возмущений концентрации ионосферной плазмы по результатам спутниковых волновых измерений.

Методы исследования и степень достоверности результатов

Лабораторные эксперименты в рамках диссертационного исследования выполнены на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», входящем в состав уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН» [29]. Большие размеры установки обеспечивают возможность проведения экспериментов в приближении «безграничной» плазмы, позволяющем свести к минимуму влияние стенок камеры на исследуемые волновые процессы. Высокая повторяемость параметров плазмы от одного цикла работы установки к другому позволяет выполнять детальные измерения параметров исследуемых процессов в режиме накопления данных с высоким пространственным и временным разрешением. Достоверность получаемых результатов обеспечивается использованием надежных методов диагностики, а также путем сопоставления результатов прямых и косвенных измерений, выполняемых с помощью различных диагностик.

Численное моделирование выполнено методом FDTD, представляющим собой явную численную схему, построенную на основе уравнений Максвелла с учетом поляризационного отклика плазмы. Для расчетов использована оригинальная программа, написанная на языках C/C++. Использование адаптируемых сеток и алгоритмов распределенных (параллельных) вычислений в программной реализации модели позволяет исследовать распространение свистовых волн с широким пространственным спектром в присутствии существенно разномасштабных неоднородностей концентрации плазмы в крупной расчетной области. Достоверность получаемых в численных экспериментах результатов обеспечивается путем тестирования программы, в ходе которого контролируется выполнение теоретического закона дисперсии волн, воспроизведение структур полей простых источников и особенностей распространения свистовых волн вдоль неоднородностей концентрации с простыми профилями. В целях верификации модели выполнялись контрольные численные эксперименты на измельченных сетках и в расширенных расчетных областях. Результаты численного моделирования сопоставлялись с полученными в модельных лабораторных экспериментах картами волновых полей, и демонстрировали хорошее соответствие.

Основные положения, выносимые на защиту

1. По результатам модельных лабораторных экспериментов, выполненных на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», установлено, что пробная свистовая волна, распространяющаяся в магнитоактивной плазме, модифицированной интенсивной свистовой волной с амплитудной модуляцией (волной накачки), испытывает амплитудно-частотную модуляцию с тем же периодом – кроссмодуляцию. Эффект кроссмодуляции обусловлен вариациями показателя преломления пробной волны, индуцированными волной накачки. При низких частотах (длинных периодах)

модуляции возмущения показателя преломления связаны с изменением концентрации электронов. При высоких частотах (малых периодах) модуляции эффект кроссмодуляции обусловлен нелинейными токами и соответствующими им возмущениями магнитного поля.

2. В системах вытянутых неоднородностей магнитоактивной плазмы с повышенной относительно фонового значения концентрацией наблюдаются различные режимы волноводного распространения квазипродольных свистовых волн. Численное моделирование и аналитическое рассмотрение указывают на существование характерного поперечного масштаба неоднородностей d_0 , зависящего от величины возмущения концентрации плазмы в неоднородностях, их поперечного размера, а также от частоты излучения. Неоднородности, ширина которых превосходит d_0 , являются независимыми плазменными волноводами. В группах близко расположенных неоднородностей, ширина которых существенно меньше d_0 , волноводные свойства отдельных неоднородностей не проявляются в силу большого масштаба локализации их мод; такие мелкомасштабные структуры могут быть заменены эквивалентным волноводом со сглаженным на масштабе d_0 профилем. В промежуточном случае, в группах неоднородностей с поперечными размерами порядка d_0 , реализуется режим связанных волноводов.
3. В соответствии с результатами численного моделирования, в широком диапазоне параметров лабораторной и ионосферной плазмы группы вытянутых неоднородностей с пониженной концентрацией электронов поддерживают распространение косых свистовых волн, или волн конической рефракции, в режиме связанных волноводов.
4. В лабораторных экспериментах системы вытянутых вдоль внешнего магнитного поля неоднородностей с пониженной концентрацией плазмы, моделирующие систему ионосферных неоднородностей, могут быть созданы путем локального высокочастотного нагрева плазмы гребенкой компактных антенн. Формирование неоднородностей происходит за счет термодиффузионного перераспределения плазмы при ее локальном нагреве в ближнем поле каждой из антенн. При распространении пробных свистовых волн вдоль систем таких неоднородностей происходит перекачка энергии из одной неоднородности в другую, и, таким образом, экспериментально реализуется режим связанных волноводов.
5. Численное и лабораторное моделирование показывают, что группы плазменных неоднородностей, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля, являются специфическими направляющими структурами для волн свистового диапазона частот, которые обладают свойствами, отличными от свойств волноводных каналов с простым поперечным профилем. Мелкомасштабная внутренняя структура является неотъемлемым свойством искусственных ионосферных дактов и должна учитываться в моделях рас-

пространения свистовых волн через модифицированную мощным коротковолновым излучением ионосферу.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в 5 статьях в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах [А1–А5], 4 трудах российских и международных конференций [А6–А9], обсуждались на семинарах Института прикладной физики РАН, докладывались на следующих конференциях: XXVI, XXVII и XXVIII научные школы «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2012, 2016 и 2018 гг.), VIII, IX, XI – XV ежегодные конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, 2013, 2014, 2016 – 2020 гг.), XIII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2013 г.), XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Москва, 2015 г.), XII Международная конференция «Сеточные методы для краевых задач и приложения» (Казань, 2016 г.), XVI Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2018 г.), XXVI Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн» (Казань, 2019 г.)

Личный вклад автора

Все результаты, изложенные в настоящей диссертации, получены лично автором либо при непосредственном его участии.

Лабораторные эксперименты выполнены в соавторстве, при этом роль автора в постановке экспериментов, обработке и анализе результатов является определяющей. Для создания неоднородностей концентрации автором предложена и реализована методика высокочастотного нагрева лабораторной плазмы несколькими точечными источниками, включая выбор конструкции и способов запитки антенн, управления и контроля мощности, подводимой к антеннам.

Автор лично разработал методику численного моделирования распространения свистовых волн в присутствии мелкомасштабных неоднородностей на основе метода FDTD, и реализовал соответствующее программное обеспечение. Интерпретация полученных результатов была выполнена в соавторстве с Т.М. Заборонковой.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Список литературы состоит из 125 наименований, общий объём диссертации составляет 121 страницу, включает 54 рисунка и 1 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи работы, отмечена научная новизна проведённого исследования, его теоретическая и практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, указаны методы исследования и степень достоверности полученных результатов, описаны структура и объём диссертации, а также отмечены публикации и личный вклад автора.

Глава 1 посвящена методам лабораторного и численного моделирования, которые использовались в диссертационном исследовании. Поскольку основным объектом исследования являются свистовые волны – специфические моды магнитоактивной плазмы, в **разделе 1.1** даются их основные свойства, знание которых важно для понимания полученных в диссертации результатов.

Раздел 1.2 посвящен описанию лабораторного эксперимента. В **параграфе 1.2.1** описан крупномасштабный плазменный стенд «Крот», входящий в состав уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов» ИПФ РАН [29]. Установка работает в импульсно периодическом режиме. Плазма создается импульсным ВЧ разрядом в атмосфере аргона либо гелия при давлении $p = 2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ торр. Внешнее магнитное поле индукцией до $B_0 = 450$ Гс создается с помощью соленоида, установленного внутри вакуумной камеры. Максимальная концентрация плазмы достигается к моменту окончания ВЧ ионизирующего импульса и может достигать $N_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при температуре электронов до 10 эВ. Длина плазменного столба при разряде во внешнем магнитном поле составляет около 4 м, полный диаметр плазмы – 1.5 м, диаметр однородной части (по уровню 50 % от максимального значения) – до 1 м. Измерения, как правило, проводятся в спокойной распадающейся плазме после выключения плазмосоздающих генераторов. Установление плавного профиля распадающейся плазмы происходит за счет процессов диффузии. Характерное время установления плавного профиля определяется индукцией магнитного поля и сортом рабочего газа; время распада плазмы варьирует в пределах 1–4 мс. На стадии распада температура электронов снижается до температуры ионов, 0.3–0.5 эВ, и остается практически неизменной в течение распада. Высокая воспроизводимость параметров плазмы от одного «выстрела» установки к другому позволяет проводить подробные измерения в режиме многократных повторений.

Параграф 1.2.2 посвящен технике измерения волновых полей и возмущений магнитного поля с помощью одно- и многovitковых рамочных антенн. Обсуждаются вопросы расчета фактической величины переменного магнитного поля и точности измерений. Применение зонда с СВЧ резонатором на отрезке двухпроводной линии, предложенного в работе [34] для измерения абсолютного значения концентрации плазмы и её нестационарных воз-

мушений, описано в **параграфе 1.2.3**. В частности, раскрываются детали модифицированной методики измерения возмущений концентрации, использованной в диссертационном исследовании.

Раздел 1.3 посвящен методике численного моделирования распространения свистовых волн в неоднородной магнитоактивной плазме. В основе математической модели лежит система уравнений Максвелла, дополненная линейаризованным уравнением, описывающим поляризационный отклик электронов. При этом ионы считаются неподвижными, эффекты пространственной дисперсии не учитываются (**параграф 1.3.1**). Поиск приближенного решения системы уравнений, составляющих математическую модель, осуществляется методом FDTD. Суть метода заключается в построении явной разностной схемы, аппроксимирующей исходные дифференциальные уравнения на пространственно-временной сетке с точностью до второго порядка по размерам ячеек сетки [35]. Детали перехода к системе разностных уравнений описаны в **параграфе 1.3.2**. **Параграф 1.3.3** посвящен вопросам реализации виртуальных поглотителей, необходимых для исключения нефизичного отражения электромагнитных волн от границ расчетной области. В диссертационном исследовании использовались поглотители двух видов. Высокоэффективный с точки зрения использования вычислительных ресурсов поглотитель типа идеально согласованного слоя (PML-поглотитель) [36] использовался для ослабления волн в направлении вдоль внешнего магнитного поля. Поскольку в магнитоактивной плазме PML-поглотитель, плоскость которого ориентирована параллельно внешнему магнитному полю, оказывается неустойчив по отношению к раскачке квазиэлектростатических колебаний [38], границы, параллельные магнитному полю, защищались другим, омическим поглотителем, реализуемым за счет введения дополнительной проводимости среды. **Параграфы 1.3.4** и **1.3.5** посвящены реализации начальных и граничных условий в рамках численной схемы, а также специфическим вопросам моделирования распространения монохроматических волн, соответственно.

Глава 2 посвящена лабораторному моделированию параметрического взаимодействия интенсивных свистовых волн в магнитоактивной плазме. Лабораторные эксперименты мотивированы результатами натурных наблюдений эффектов возникновения комбинационных частот в спектрах квазимонохроматических свистовых волн во время активного волнового воздействия на околоземную плазму с использованием мощных наземных передатчиков [18,37].

Постановка эксперимента описана в **разделе 2.1**. Интенсивная свистовая волна с амплитудной модуляцией (волна накачки) излучалась в плазму с помощью рамочной антенны. Область плазмы, модифицированная волной накачки, просвечивалась волной свистового диапазона частот малой амплитуды (пробной волной). В ходе эксперимента выполнялась регистрация спектров сигналов в диапазонах частот пробной волны и накачки. Одновременно про-

изводились измерения возмущений внешнего магнитного поля и концентрации плазмы, вызванных воздействием накачки.

Описанию результатов эксперимента посвящен **раздел 2.2**. Установлено, что при распространении через возмущенную область спектр пробной волны обогащается эквидистантными узкополосными спутниками, отстоящими от несущей на интервалы, кратные частоте модуляции накачки, при этом спектр сигнала ассиметричен относительно несущей (рис. 1). Анализ сигналов свидетельствует о возникновении комбинированной амплитудно-фазовой модуляции пробной волны с периодом, соответствующим периоду модуляции накачки, или кроссмодуляции. Измерения, выполненные в разных точках плазменного объема, показывают, что уровень нелинейных искажений сигнала нарастает вдоль трассы его распространения. Одновременно в эксперименте зарегистрированы возмущения концентрации плазмы и магнитного поля с периодом модуляции накачки, которые, по всей видимости, и приводят к модуляции пробной волны.

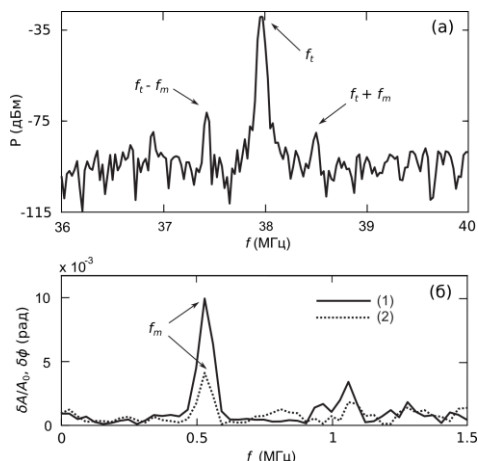


Рис. 1. Спектры: *a* – пробной волны, принимаемой из плазмы в присутствии амплитудно-модулированной накачки; *б* – модуляции амплитуды ($\Delta A/A_0$, кривая 1) и фазы заполнения ($\Delta \phi$, кривая 2) пробной волны

Обсуждение результатов эксперимента содержится в **разделе 2.3**. Возникновение возмущений концентрации на частоте модуляции накачки связано, по всей видимости, со стрикционным либо термодиффузионным вытеснением плазмы из области сильного поля.

Генерация возмущений магнитного поля на частоте модуляции накачки обусловлена двумя механизмами. Первый связан с диамагнитным эффектом за счет модуляции давления плазмы в области возмущений концентрации и температуры. Проявления подобного механизма генерации низкочастотных

магнитных полей наблюдались в активных ионосферных экспериментах [39,40]. Второй механизм связан с возникновением дрейфовых токов под действием поперечной компоненты усредненной ponderomotive силы, действующей на электроны в поперечно ограниченном высокочастотном поле [41]. При прочих равных условиях первый механизм проявляется при низких частотах модуляции накачки. Второй механизм, будучи малоинерционным, доминирует при высоких частотах модуляции.

Оценки показывают, что при относительно низких частотах модуляции накачки возникновение фазовой модуляции пробной волны связано с изменением оптической толщины плазмы на трассе распространения между приемной и излучающей антеннами. Амплитудная модуляция может возникать за счет вариаций условий излучения и распространения пробной волны при наличии возмущений концентрации плазмы.

Таким образом, в главе 2 показано, что амплитудно-фазовая модуляция пробных волн в области плазмы, модифицированной волной накачки, накапливается по трассе распространения и обусловлена возмущениями концентрации плазмы и магнитного поля. Обнаруженный режим кроссмодуляции низкочастотных волн может реализоваться в слабостолкновительной плазме магнитосферы, а также в ионосфере при работе мощных наземных передатчиков в ночные часы. Аналогичный режим модуляции низкочастотных волн может быть реализован при двухчастотном воздействии на околоземную плазму с помощью мощных наземных передатчиков с близкими несущими. В этом случае возмущения параметров плазмы возникают на частоте биений накачки, и обе волны накачки испытывают модуляцию, проявляющуюся как обогащение спектра принимаемого сигнала спутниками, отстроенными от несущих на частоту биений. Материалы главы опубликованы в статье [A1] и в трудах конференций [A6, A7].

Глава 3 посвящена численному моделированию распространения свистовых волн при наличии системы случайных неоднородностей концентрации плазмы, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля, при параметрах активного ионосферного эксперимента, выполненного с использованием нагревного стенда «Сура», длинноволнового передатчика и ИСЗ DEMETER [19]. Целью исследования была оценка волноводных свойств искусственного ионосферного дакта, содержащего неоднородности концентрации с различными поперечными масштабами, включая поиск новых режимов волноводного распространения.

Численный эксперимент, постановка которого описана в **разделе 3.1**, заключался в исследовании волнового поля, формируемого при рассеянии пучка пробных свистовых волн на системе неоднородностей с заданным профилем. Для получения наглядной физической картины использовалась модель однородных фоновой плазмы и внешнего магнитного поля. Слаборасходящийся пучок пробных волн излучался системой внешних токов, эквивалентной антенне бегущей волны. Для генерации случайных профилей систем не-

однородностей с заданными характеристиками применялась специальная процедура. Характерная величина возмущений концентрации составляла 20%, диапазон поперечных размеров неоднородностей составлял от 100 м до 2 км.

Распространение свистовых волн при наличии мелкомасштабных неоднородностей может сопровождаться возбуждением волн с широким пространственным спектром, что, в свою очередь, требует применения подробных пространственных сеток. Поскольку используемый в расчетах метод FDTD является достаточно ресурсоемкой численной схемой, вместо трехмерного полноволнового моделирования выполнялось двумерное.

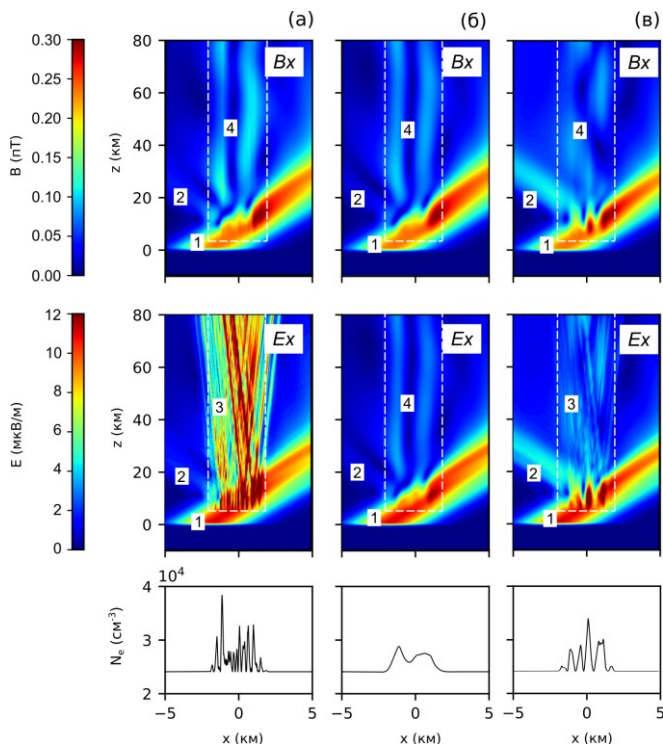


Рис. 2. Модули комплексных амплитуд компонент E_x и B_x электромагнитного поля в численных экспериментах с различными параметрами неоднородностей: *a* – система случайных неоднородностей с поперечными масштабами $100 \text{ м} < d < 300 \text{ м}$; *б* – неоднородности, профиль которых построен путем сглаживания профиля (а) с характерным масштабом 1.5 км; *в* – система неоднородностей с поперечными масштабами $600 \text{ м} < d < 1 \text{ км}$. Цифрами обозначены: 1 – падающая волна, 2 – отраженная волна, 3 – квазиэлектростатические волны резонансного конуса излучения, возбуждающиеся при рассеянии пробной волны на неоднородностях, 4 – захваченные волны, распространяющиеся вдоль неоднородностей

Результаты экспериментов, включая карты амплитуд полей, пространственные спектры, результаты расчетов поляризационных и энергетических характеристик электромагнитных волн, приведены в **разделе 3.2**. На границе системы неоднородностей происходит рассеяние пучка пробных волн. Часть волновой энергии идет на возбуждение квазиэлектростатических волн резонансного конуса излучения, часть энергии трансформируется в захваченные волны, распространяющиеся вдоль системы неоднородностей в волноводном режиме, о чем свидетельствует сохранение энергии, переносимой этими волнами, через поперечное сечение системы неоднородностей (рис. 2). Установлено, что свойства волноводных мод систем неоднородностей существенным образом зависят от поперечных размеров неоднородностей и их глубины. Полученные результаты были сопоставлены с решениями модельных задач о распространении свистовых волн вдоль отдельных плоских двумерных и трехмерных цилиндрических дактов (**раздел 3.3**).

Исходя из результатов численных экспериментов и аналитического рассмотрения, описанных в главе 3, было показано, что в магнитоактивной плазме системы неоднородностей с повышенной концентрацией электронов, вытянутые вдоль внешнего магнитного поля, при любом поперечном размере отдельных неоднородностей образуют плазменные волноводы для свистовых волн. Особенности волноводного распространения зависят от отношения между характерным поперечным размером неоднородностей d и критическим масштабом d_0 .

— Широкие неоднородности $d > d_0$ являются независимыми волноводами, поддерживающими распространение несобственных мод.

— Системы узких ($d \ll d_0$) неоднородностей, расположенных близко друг к другу, с точки зрения волноводных свойств подобны дактам, чьи поперечные профили повторяют профили исходных систем, сглаженных на масштабе d_0 .

— Группы неоднородностей с поперечными размерами $d \sim d_0$ поддерживают распространение волн в режиме «связанных волноводов». В этом случае излучение распространяется вдоль неоднородностей в волноводном режиме, но за счет перекрытия мод соседних неоднородностей между ними постоянно идет обмен волновой энергией.

Значение критического масштаба d_0 определяется параметрами фоновой плазмы, характерной величиной концентрации внутри отдельных неоднородностей и частотой излучения. В условиях активного эксперимента, выполненного с использованием стенда «Сура» и спутника DEMETER [19], значение критического масштаба для волн с частотой 18 кГц составляет около 1 км.

Распространение свистовых волн вдоль систем вытянутых неоднородностей с повышенной концентрацией сопровождается их пространственной модуляцией, имеющей двойственную природу. Во-первых, рассеяние свистовых волн на мелкомасштабных неоднородностях приводит к возбуждению квази-

электростатических волн резонансного конуса излучения. Во-вторых, неоднородности с поперечными размерами $d \gtrsim d_0$, образуя независимые либо связанные волноводы, формируют пространственную структуру волнового поля, соответствующую интерференции их мод. Последний эффект может быть использован для волновой диагностики плазменных структур в ионосфере и магнитосфере. Материалы главы опубликованы в статье [A5] и трудах конференции [A9].

В главе 4 рассмотрены результаты лабораторного и численного моделирования распространения свистовых волн вдоль групп неоднородностей с пониженной концентрацией плазмы. Актуальность такой постановки задачи связана с возможностью возникновения подобных неоднородностей при формировании искусственных ионосферных дактов в процессе нагрева ионосферы излучением передатчиков различных диапазонов частот [42, 43], а также с существованием естественных мелкомасштабных неоднородностей в авроральной ионосфере [44].

Раздел 4.1 посвящен численному моделированию. Постановка численных экспериментов, описанная в **параграфе 4.1.1**, в целом, близка численным экспериментам с неоднородностями с повышенной концентрацией. Результаты численных экспериментов, в том числе выполненных в условиях, характерных для натурных экспериментов [19], приведены в **параграфе 4.1.2**; их обсуждению посвящен **раздел 4.1.3**. В целом, системы неоднородностей с пониженной концентрации подобно неоднородностям с повышенной концентрацией образуют единые волноводные структуры, обладающие при этом, своей выраженной спецификой – направляемые неоднородностями волны оказываются похожими по своим свойствам на волны моды Жандрена.

Раздел 4.2 посвящен экспериментальному исследованию распространения свистовых волн вдоль групп неоднородностей с пониженной концентрацией плазмы. Эксперименты были выполнены на крупномасштабном плазменном стенде «Крот». Методика формирования неоднородностей с пониженной концентрацией за счет термодиффузионного перераспределения плазмы в процессе локального многопозиционного радиочастотного нагрева описана в **параграфе 4.2.1**. Результатам экспериментов по распространению излучения вдоль нескольких неоднородностей посвящен **параграф 4.2.2**. Основным результатом стало наблюдение эффекта перекачки волновой энергии, наблюдавшегося даже на относительно коротких трассах распространения (рис. 3). **Раздел 4.3** посвящен результатам главы.

Таким образом, в главе 4 в численных экспериментах продемонстрированы и изучены волноводные режимы распространения свистовых волн вдоль систем мелкомасштабных неоднородностей. В случае достаточно узких и близко расположенных неоднородностей происходит непрерывный обмен волновой энергией между ними, в результате вся система неоднородностей становится единой волноведущей структурой со сложной системой собственных мод. Спектр продольных волновых чисел в таком случае определяется

характерной глубиной отдельных неоднородностей; в частности, он оказывается богаче, чем спектр захваченных волн эквивалентного дакта, профиль которого повторяет усредненный профиль системы неоднородностей. Пространственная модуляция, обусловленная интерференцией собственных мод отдельных неоднородностей, может быть использована для волновой диагностики плазменных структур в ближнем космосе.

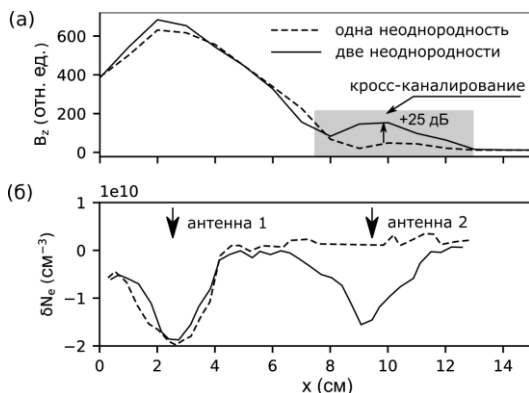


Рис. 3. Поперечное распределение амплитуды свистовой волны в плазме с одной и с двумя неоднородностями (а), формируемыми за счет ВЧ-нагрева, б – поперечное распределение концентрации плазмы; положения антенн указаны стрелками. Источником свистовой волны является антенна, формирующая первую неоднородность. Плотность невозмущенной плазмы $N_e = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, магнитное поле $B_0 = 180 \text{ Гс}$; частота пробной волны $f = 160 \text{ МГц}$, вторая неоднородность формируется излучением с частотой 75 МГц . Результаты получены на расстоянии $z = 30 \text{ см}$ от антенн

Результаты численного моделирования получены в двумерной постановке, однако, в соответствии с приведенной интерпретацией, следует ожидать, что основные выводы верны и в трехмерном случае. Результаты лабораторных экспериментов находятся в соответствии с результатами расчетов. Материалы главы опубликованы в статьях [А2–А4], и трудах конференций [А7–А9].

В **Заключении** перечислены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В лабораторных экспериментах, выполненных на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», обнаружено и исследовано явление кроссмодуляции волн свистового диапазона частот в слабостолкновительной замагниченной плазме. Наблюдается амплитудно-фазовая модуляция пробных волн малой интенсивности, проходящих через область плазмы, модифицированную

мощной волной накачки с модуляцией огибающей. При больших периодах модуляции накачки обогащение спектра пробных волн происходит преимущественно за счет возмущений плотности плазмы; при малых периодах модуляции пробных волн обусловлена низкочастотными нелинейными токами и соответствующими им возмущениями магнитного поля.

Создана оригинальная численная модель распространения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме на основе прямого решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области (FDTD). Модель позволяет исследовать взаимодействие свистовых волн с неоднородной плазмой при параметрах лабораторных и натуральных ионосферных экспериментов. Использование адаптируемых сеток и алгоритмов распределенных (параллельных) вычислений в программной реализации модели позволяет исследовать распространение свистовых волн с широким пространственным спектром в присутствии разномасштабных неоднородностей концентрации плазмы в крупной расчетной области.

Распространение свистовых волн в магнитоактивной плазме, содержащей группы мелкомасштабных (от 100 м до 1 км) неоднородностей с повышенной концентрацией, вытянутых вдоль магнитного поля, изучено методами численного моделирования и аналитически. Параметры моделирования выбраны соответствующими активному эксперименту с использованием нагревного стенда «Сура», наземного низкочастотного передатчика и спутника DEMETER. Показано, что в системах вытянутых неоднородностей магнитоактивной плазмы с повышенной относительно фонового значения концентрацией наблюдаются различные режимы волноводного распространения свистовых волн. Для заданной величины возмущения концентрации в неоднородностях и частоты излучения существует характерный поперечный размер неоднородностей d_0 . Неоднородности, ширина которых превосходит d_0 , являются независимыми плазменными волноводами. В группах близко расположенных неоднородностей, ширина которых существенно меньше d_0 , волноводные свойства отдельных неоднородностей не проявляются в силу большого масштаба локализации их мод; такие мелкомасштабные структуры могут быть заменены эквивалентными волноводами со сглаженным на масштабе d_0 профилем. В промежуточном случае, в группах неоднородностей с поперечными размерами порядка d_0 , реализуется режим связанных волноводов. Для параметров рассматриваемого активного ионосферного эксперимента $d_0 \approx 1$ км.

Методами численного моделирования и аналитически исследовано волновое распространение косых свистовых волн в замагниченной плазме с системой неоднородностей с пониженной относительно фонового значения концентрацией. Установлено, что в такой системе реализуется режим связанных волноводов, в котором каждая из неоднородностей непрерывно обменивается энергией с соседними неоднородностями за счет перекрытия их собственных мод.

Предложена и экспериментально реализована методика генерации систем неоднородностей с пониженной концентрацией, моделирующих неоднородную структуру околоземной плазмы, путем многопозиционного высокочастотного нагрева магнитоактивной плазмы гребенкой компактных антенн. Формирование неоднородностей происходит за счет термодиффузионного перераспределения плазмы при ее локальном нагреве в ближнем поле каждой из антенн. С использованием указанной методики на стенде «Крот» экспериментально показано распространение свистовых волн вдоль системы из двух плазменных неоднородностей в режиме связанных волноводов.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Helliwell R.A.* VLF wave stimulation experiments in the magnetosphere from Siple Station, Antarctica // *Reviews of Geophysics*. 1988. Vol. 26, no. 3, P. 551-578.
- [2] *Cohen M.B., Inan U.S.* Terrestrial VLF transmitter injection into the magnetosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2012. Vol. 117, no. A8. P. A08310.
- [3] *Storey L.R.O.* An investigation of whistling atmospherics // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1953. Vol. 246, no. 908. P. 113-141.
- [4] *Helliwell R.A.* Low-frequency waves in the magnetosphere // *Reviews of Geophysics*. 1969. Vol. 7, no. 1-2. P. 281-303.
- [5] *Demekhov A.G., Taubenschuss U., Santolik O.* Simulation of VLF chorus emissions in the magnetosphere and comparison with THEMIS spacecraft data // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017. Vol. 122, no. 1. P. 166-184.
- [6] *Shklyar D., Matsumoto H.* Oblique whistler-mode waves in the inhomogeneous magnetospheric plasma: resonant interactions with energetic charged particles // *Surveys in Geophysics*. 2009. Vol. 30, issue 2. P. 55-104.
- [7] *Reznikov A.E., Rudenchik E.A., Sarostin S.V.* VLF radiation generated by a loop antenna in P2 layer of the ionosphere—2. Interpretation of the measurements // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1995. Vol. 57, no. 11. P. 1299-1308.
- [8] *Fung S.F., Benson R.F., Green J.L., Reinisch B.W., Haines D.M., Galkin I.A., Bougeret J.-L., Manning R., Reiff P.H., Carpenter D.L., Gallagher D.L., Taylor W.W.L.* Observations of magnetospheric plasmas by the radio plasma imager (RPI) on the image mission // *Advances in Space Research*. 2002. Vol. 30, no. 10. P. 2259-2266.
- [9] *Allcock G.M.* A study of the audio frequency radio phenomenon known as "dawn chorus" // *Australian Journal of Physics*. 1957. Vol. 10, no. 2. P. 286-297.

- [10] Santolik O., Kletzing C.A., Kurth W.S., Hospodarsky G.B., Bounds S.R. Fine structure of large-amplitude chorus wave packets // *Geophysics Research Letters*. 2014. Vol. 41, no. 2. P. 293-299.
- [11] Angerami J.J., Carpenter D.L. Whistler studies of the plasmopause in the magnetosphere: 2. Electron density and total tube electron content near the knee in magnetospheric ionization // *Journal of Geophysical Research*. 1966. Vol. 71, no. 3. P. 711-725.
- [12] Sonwalkar V.S., Carpenter D.L., Bell T.F., Spasojević M., Inan U.S., Li J., Chen X., Venkatasubramanian A., Harikumar J., Benson R.F., Taylor W.W.L., Reinisch B.W. Diagnostics of magnetospheric electron density and irregularities at altitudes <5000 km using whistler and Z-mode echoes from radio sounding on the IMAGE satellite // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2004. Vol. 109, no. A11. P. A11212 (1-22).
- [13] Helliwell R.A., Katsufurakis J.P. VLF wave injection into the magnetosphere from Siple Station, Antarctica // *Journal of Geophysical Research*. 1974. Vol. 79, no. 16. P. 2511-2518.
- [14] Vampola A.L., Kuck G.A. Induced precipitation of inner zone electrons. 1. Observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1978. Vol. 83, no. A6. P. 2543-2551.
- [15] Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V., Rietveld M.T. Past, present and future of active radio frequency experiments in space // *Space Science Reviews*. 2018. Vol. 214, no. 8. P. 118.
- [16] Tanaka Y., Lagoutte D., Hayakawa M., Lefeuvre F., Tajima S. Spectral broadening of VLF transmitter signals and sideband structure observed on Aureol 3 satellite at middle latitudes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1987. Vol. 92, no. A7. P. 7551-7559.
- [17] Sotnikov V.I., Fiala V., Lefeuvre F., Lagoutte D., Mogilevsky M. Excitation of sidebands due to nonlinear coupling between a VLF transmitter signal and a natural ELF emission // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1991. Vol. 96, no. A7. P. 11363-11369.
- [18] Golkowski M., Inan U.S., Cohen M.B. Cross modulation of whistler mode and HF waves above the HAARP ionospheric heater // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36, no. 15. P. A10201.
- [19] Rapoport V. O., Frolov V.L., Polyakov S.V., Komrakov G.P., Ryzhov N.A., Markov G.A., Belov A.S., Parrot M., Rauch J.-L. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2010. Vol. 115, no. A10. P. A10322.
- [20] Pasmanik D.L., Demekhov A.G. Peculiarities of VLF wave propagation in the Earth's magnetosphere in the presence of artificial large-scale inhomogeneity // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017. Vol. 122, no. 8. P. 8124-8135.

- [21] *Trakhtengerts V.Y., Hayakawa M.* A wave-wave interaction in whistler frequency range in space plasma // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 1993. Vol. 98, no. A11. P. 19205-19217.
- [22] *Островский Л.А., Степанов Н.С.* Нерезонансные параметрические явления в распределенных системах // *Известия вузов. Радиофизика.* 1971. Т. 14, № 4. С. 489-529.
- [23] *Milikh G.M., Papadopoulos K., Shroff H., Chang C.L., Wallace T., Mishin E.V., Parrot M., Berthelier J.J.* Formation of artificial ionospheric ducts // *Geophysical Research Letters.* 2008. Vol. 35, no. 10. P. L10102 (1-5).
- [24] *Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K.* Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2003. Vol. 108, no. A4. P. 1141.
- [25] *Фролов В.Л., Ранопорт В.О., Комраков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Пош Ж.Л., Парро М., Мишин Е.В.* Создание дактов плотности при нагреве ионосферы земли мощным коротковолновым радиоизлучением // *Письма в ЖЭТФ.* 2008. Т. 88, № 12. С. 908-913.
- [26] *Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., Parrot M., Galkin I., Reinisch B., Huba J., Joyce G., Papadopoulos K.* Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2012. Vol. 117, no. A10. P. A10307.
- [27] *Woodroffe J.R., Streltsov A.V., Vartanyan A., Milikh G.M.* Whistler propagation in ionospheric density ducts: Simulations and DEMETER observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2013. Vol. 118, no. 11. P. 7011-7018.
- [28] *Митяков Н.А., Алимов В.А., Зиничев В.А., Комраков Г.П., Митяков С.Н.* Исследование мелкомасштабной турбулентности в слое F ионосферы методом обратного рассеяния коротких радиоволн // *Известия вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 5-6. С. 329-337.
- [29] УНУ ККГС // [сайт] URL: <https://unu.ipfran.ru/>
- [30] *Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г.* Космическая электродинамика // М.: Мир. 1967. 260 с.
- [31] *Карпман В.И., Кауфман Р.Н.* Об особенностях распространения свистовых волн в магнитосферных дактах в приэкваториальной области. 1. Дакты с повышенной плотностью // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1983. Т. 23, № 3. С. 451-457.
- [32] *Карпман В.И., Кауфман Р.Н.* Об особенностях распространения свистовых волн в магнитосферных дактах в приэкваториальной области. 2. Дакты с пониженной плотностью // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1983. Т. 23, № 5. С. 791-796.
- [33] *Заборонкова Т.М., Костров А.В., Кудрин С.В., Тихонов А.В., Шайкин А.А.* Каналирование волн свистового диапазона частот в неоднородных плаз-

- менных структурах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1992. Т. 101, №. С. 1151-1166.
- [34] *Stenzel R.L.* Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasmas // Review of Scientific Instruments. 1976. Vol. 47, no. 5. P. 603-607.
- [35] *Inan U.S., Marshall R.A.* Numerical Electromagnetics: The FDTD Method // New York: Cambridge University Press. 2011.
- [36] *Berenger J.-P.* A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // Journal of Computational Physics. 1994. Vol. 114, no. 2. P. 185-200.
- [37] *Helliwell R.A., Inan U.S., Katsufakis J.P., Carpenter D.L.* Beat excitation of whistler mode sidebands using the Siple VLF transmitter // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1986. Vol. 91, no. A1. P. 143-153.
- [38] *Chevalier T.W., Inan U.S., and Bell T.F.* Terminal impedance and antenna current distribution of a vlf electric dipole in the inner magnetosphere // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008. Vol. 56, no. 8. P. 2454-2468.
- [39] *Papadopoulos K., Wallace T., Milikh G.M., Peter W., McCarrick M.* The magnetic response of the ionosphere to pulsed HF heating // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32, no. 13. P. L1310 1-4
- [40] *Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н., Перишин А.В., Иванов В.Н., Есин В.П.* Свойства УНЧ/ОНЧ сигналов, генерируемых стендом «Сура» в верхней ионосфере // Известия вузов. Радиофизика. Т. 56, № 6. С. 382-394.
- [41] *Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский А.В.* Параметрическая генерация свистовых волн при взаимодействии высокочастотных волновых пучков с магнитоактивной плазмой // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 11. С. 834-838.
- [42] *Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Котик Д.С., Митяков Н.А., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Сергеев Е.Н., Терещенко Е.Д., Толмачева А.В., Урядов В.П., Худукон Б.З.* Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 177, № 3. С. 330-340.
- [43] *Котик Д.С., Выборнов Ф.И., Рябов А.В., Перишин А.В., Яшинов В.А.* Обнаружение наземными методами турбулентности, генерируемой во внешней ионосфере излучением мощного сверхдлинноволнового передатчика // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 6. С. 456-461.
- [44] *Knudsen D.J., Bock B.J.J., Bounds S.R., Burchill J.K., Clemmons J.H., Curtis J.D., Eriksson A.I., Koepeke M.E., Pfaff R.F., Wallis D.D., Whaley N.* Lower-hybrid cavity density depletions as a result of transverse ion acceleration localized on the gyroradius scale // Journal of Geophysical Research. Space Physics. 2004.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский А.В. Кроссмодуляция волн свистового диапазона частот в магнитоактивной плазме // Письма в ЖЭТФ. 2015. т. 101. вып. 4, С. 254-257.

A2. Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Заборонкова Т.М., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В. Численное моделирование волн свистового диапазона в замагниченной плазме с мелкомасштабными неоднородностями // Физика плазмы. 2017. т. 43. вып. 12, С. 1018-1028.

A3. Айдакина Н.А., Галка А.Г., Гундорин В.И., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Лоскутов К.Н., Могилевский М.М., Привер С.Э., Стриковский А.В., Чугунин Д.В., Янин Д.В. Моделирование физических явлений в ионосфере и магнитосфере Земли на плазменном стенде «Крот»: некоторые результаты и перспективы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. т. 58. № 3, С. 331-342

A4. Aidakina N., Gushchin M., Zudin I., Korobkov S., Strikovskiy A. Laboratory study of interaction of magnetoplasma irregularities produced by several radio-frequency heating sources // Physics of Plasmas. 2018. v. 25. No. 7, P. 072114

A5. Zudin I.Yu., Zaboronkova T.M., Gushchin M.E., Aidakina N.A., Korobkov S.V., Krafft C. Whistler waves' propagation in plasmas with systems of small-scale density irregularities: numerical simulations and theory // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2019. v. 124. No. 6, P. 4739-4760

A6. Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский А.В. Интермодуляционные эффекты, возникающие при многочастотном воздействии на магнитоактивную плазму // Труды международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 9–14 сентября 2013. Редакционно-издательский отдел ИСЗФ СО РАН. С. 140-142.

A7. Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Фролов В.Л. Лабораторное и численное моделирование распространения волн свистового диапазона частот в замагниченной плазме с мелкомасштабными неоднородностями // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ-24). Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014 г. Т. III. Издательский отдел ИСЗФ СО РАН. С. 25-28.

A8. Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Коробков С.В. Численное моделирование распространения свистовых волн в магнитоактивной плазме, модифицированной воздействием интенсивного радиочастотного излучения // Материалы одиннадцатой международной конференции «Сеточные методы для краевых задач и приложения». Казань, 20 – 25 октября 2016 г. Издательство Казанского университета. С. 151-155.

А9. Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Заборонкова Т.М., Коробков С.В., Стриковский А.В. Динамика и волноводные свойства мелкомасштабных неоднородностей замагниченной плазмы: лабораторное и численное моделирование // Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». Казань, 1–6 июля 2019 г. Том II. Издательство Казанского университета. С. 35-37.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	4
Цели и задачи работы.....	6
Научная новизна работы	7
Теоретическая и практическая значимость работы	7
Основные положения, выносимые на защиту	8
Методы исследования и степень достоверности результатов	9
Структура и объем диссертации	10
Публикации и апробация результатов	11
Личный вклад автора	13
Благодарности	13
Глава 1. Методы исследований	14
1.1 Общая характеристика свистовых волн	14
1.1.1 Волны свистового о диапазона частот в однородной магнитоактивной плазме	14
1.1.2 Особенности волноводного распространения свистовых волн в неоднородной плазме	17
1.2 Описание экспериментальной установки	20
1.2.1 Крупномасштабный плазменный стенд «Крот»	20
1.2.2 Рамочные антенны для регистрации переменных магнитных полей	26
1.2.3 Зонд с СВЧ резонатором на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии	29
1.3 Численная модель распространения свистовых волн в магнитоактивной плазме и реализующая ее разностная схема	33
1.3.1 Модель	34
1.3.2 Пространственно-временная сетка и система разностных уравнений	35
1.3.3 Виртуальные поглотители	39
1.3.4 Начальные и граничные условия моделирования	42
1.3.5 Моделирование распространения монохроматических волн	43

Глава 2. Лабораторное исследование эффектов кроссмодуляции волн свистового диапазона частот	45
2.1 Постановка эксперимента	46
2.2 Результаты эксперимента	51
2.3 Обсуждение	55
2.4 Основные результаты главы	58
Глава 3 Численное моделирование распространения свистовых волн при наличии систем вытянутых неоднородностей с повышенной концентрацией магнитоактивной плазмы	59
3.1 Постановка численного эксперимента	62
3.2 Результаты численного моделирования	66
3.3 Обсуждение результатов	79
3.4 Основные результаты главы	84
Глава 4. Численное и лабораторное моделирование распространения свистовых волн в плазме с системами вытянутых неоднородностей с пониженной концентрацией	85
4.1 Численное моделирование	86
4.1.1 Постановка численного эксперимента	86
4.1.2 Результаты моделирования	88
4.1.3 Обсуждение режимов волноводного распространения	99
4.2 Лабораторное моделирование распространения свистовых волн при наличии групп плазменных неоднородностей	101
4.2.1 Методика создания систем вытянутых неоднородностей с пониженной концентрацией в лабораторной магнитоактивной плазме	101
4.2.2 Экспериментальное исследование распространения свистовой волны в плазме с двумя неоднородностями с пониженной концентрацией	105
4.3 Основные результаты главы	108
Заключение	109
Список литературы	111

ЗУДИН Илья Юрьевич

**ЛАБОРАТОРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА
В НЕСТАЦИОНАРНОЙ И НЕОДНОРОДНОЙ
МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 15.10.2020 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 42 (2020)

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46