

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ ВБЛИЗИ ЭЛЕКТРОННО-
ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА»**

Аспирант:

Малышев Михаил Сергеевич

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Костров Александр Владимирович,
заведующий лабораторией 262,
доктор физико-математических наук

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

Физика плазмы

Форма обучения: очная

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Исследование особенностей распространения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме с частотами вблизи электронно-циклотронного резонанса имеет важное значение для широкого круга фундаментальных и прикладных задач в физике лабораторной и космической плазмы. Подобного рода задачи нередко возникают при изучении различных космических объектов и явлений, в том числе и в околоземном пространстве. В частности, одна из основных проблем плазменной геофизики связана с генерацией аврорального километрового радиоизлучения (АКР) [1].

По современным представлениям генерация АКР происходит на частотах, близких к локальной гирочастоте электронов. Источник данного излучения расположен в авроральной магнитосфере Земли внутри каверн с пониженной концентрацией плазмы, сформированных вытянутыми плазменными неоднородностями [2]. Каверны окружены намного более плотной плазмой, при этом ширина их границ сопоставима с длиной возбуждаемых волн, что оказывает ключевое влияние на процессы генерации данного излучения и его выхода в космическое пространство [3]. Результаты спутниковых измерений показывают, что после выхода из области источника АКР распространяется в достаточно узком конусе (угол раствора не превышает 50°) относительно направления локального магнитного поля [4], хотя внутри каверны основной поток излучения направлен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля [5]. При этом считается, что неоднородности окружающей плазмы играют принципиальную роль в формировании столь необычно узкой диаграммы направленности АКР [6]. Тем не менее, данная особенность до сих пор не имеет объяснения [7]. Не исключено, что источник аврорального радиоизлучения расположен не внутри каверны с пониженной концентрацией плазмы, а в более плотной фоновой плазме, при этом выход излучения под малыми углами относительно локального магнитного поля обусловлен процессами трансформации и рефракции волн на неоднородностях. Помимо этого, на сегодняшний день многие другие вопросы, связанные с процессами генерации и распространения АКР, также остаются открытыми и активно обсуждаются в научной литературе [8,9].

Источниками циклотронного радиоизлучения, помимо Земли, являются также другие планеты Солнечной системы [10], обладающие собственным магнитным полем: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Тем не менее, лишь декаметровое радиоизлучение Юпитера достигает околоземного космического пространства и поэтому является наиболее изученным типом циклотронного излучения. Соответственно, как и в случае земного АКР, значительный интерес

для исследователей представляет проблема генерации декаметрового радиоизлучения Юпитера, которая также тесно связана с вопросами распространения и трансформации волн в неоднородной плазме [11]. Источник данного излучения расположен вблизи основания магнитной трубки Ио, связывающей одноимённый спутник с Юпитером [12]. Возбуждение декаметрового радиоизлучения происходит на частотах, близких к локальной электронной циклотронной частоте. При этом считается, что характер возникновения данного излучения связан в первую очередь с особенностями его распространения в пространственно неоднородном магнитном поле планеты [13]. Несмотря на большое количество информации, полученной в результате теоретических и экспериментальных исследований [14,15], на сегодняшний день многие вопросы, связанные с влиянием электромагнитного взаимодействия между Юпитером и его спутником Ио на динамику магнитосферной плазмы и на протекающие в ней процессы возбуждения и распространения декаметрового радиоизлучения, до сих пор остаются открытыми. Таким образом, изучение вопросов, связанных с распространением волн на частотах вблизи электронно-циклотронного резонанса, является актуальной задачей, поскольку специфический характер распространения циклотронного излучения в авроральных областях планет, обладающих собственным магнитным полем, может иметь определяющее значение для процессов генерации и выхода данного излучения из планетарной магнитосферы в космическое пространство.

Помимо исследования особенностей распространения волн в приближении «безграничной» плазмы, крайне важными с прикладной точки зрения являются вопросы, связанные с распространением электромагнитного излучения в пространственно ограниченной плазме и, в частности, при наличии двухпроводной системы. Система подобного типа является составной частью резонансного СВЧ-зонда [16], который успешно применяется для точного измерения концентрации плазмы с высоким пространственным разрешением как в лабораторных установках для экспериментального исследования физических явлений в плазме, так и в плазмохимических установках для контроля параметров технологического процесса. В отличие от традиционно используемых в плазменных экспериментах ленгмюровских зондов показания резонансного СВЧ-зонда в линейном режиме определяются только концентрацией плазмы и не зависят от электронной температуры.

Однако возможности зонда не ограничиваются измерениями только плотности плазмы. В частности, по изменению добротности резонансной системы при погружении в плазму можно определить частоту столкновения электронов с нейтральными частицами [17]. Помимо этого, особую роль играют нелинейные эффекты, связанные со стрикционным воздействием ВЧ-полей на плазму вблизи проводов резонатора, вследствие чего резонансный СВЧ-зонд в нелинейном режиме работы можно использовать для определения электронной температуры плазмы [18].

Высокая чувствительность зонда позволяет измерять высокочастотные флуктуации электронной концентрации в плазме низкого давления, при этом регистрируемые значения относительного возмущения плотности могут достигать порядка $\delta N_e/N_e \sim 10^{-5}-10^{-6}$ в плазме с фоновой концентрацией $N_e \sim 10^{10}-10^{12} \text{ см}^{-3}$ [19]. Также использование резонансного СВЧ-зонда в качестве диагностической аппаратуры возможно и в плазме атмосферного давления, когда частота столкновений электронов с нейтральными частицами ν_{em} превышает частоту подводимого к зонду сигнала. В таких специфических условиях можно определить мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости плазмы или величину отношения N_e/ν_{em} [20].

Приведённые выше примеры убедительно показывают, насколько многофункциональным инструментом является резонансный СВЧ-зонд, поэтому дальнейшее исследование возможностей зонда применительно к измерению параметров не только изотропной или слабозамагниченной плазмы, но и плазмы при наличии сильного магнитного поля имеет большое значение для многих прикладных задач.

Основные особенности измерения параметров магнитоактивной плазмы с помощью СВЧ-зонда были рассмотрены в работах [21-23]. В ходе теоретического анализа установлено, что выражение для резонансной частоты СВЧ-зонда зависит от его ориентации по отношению к внешнему магнитному полю, поскольку компоненты тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы отличны друг от друга. Помимо этого, определена связь резонансной частоты зонда, расположенного перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, с концентрацией плазмы и напряжённостью данного поля, а также проведена проверка полученных результатов на практике. Тем не менее, экспериментальная технологическая установка, которая использовалась авторами указанных выше работ для проведения лабораторных исследований, имеет весьма ограниченные возможности, в результате чего разработанный метод диагностики магнитоактивной плазмы был реализован в условиях достаточно узкого диапазона изменения параметров. Таким образом, дальнейшее развитие данного метода диагностики с использованием резонансного СВЧ-зонда является актуальной задачей, решение которой предусматривает в первую очередь исследование особенностей распространения электромагнитных волн в двухпроводной системе, погружённой в магнитоактивную плазму.

Цель работы

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование особенностей распространения электромагнитного излучения в магнитоактивной плазме на частотах вблизи электронно-циклотронного резонанса, разработка на основе данного

исследования модели распространения циклотронного излучения в магнитосферах ряда планет Солнечной системы и его выхода в космическое пространство через существенно неоднородную плазму, а также исследование диагностических возможностей резонансного СВЧ-зонда в условиях широкого диапазона изменения параметров магнитоактивной плазмы и внешнего магнитного поля.

Научная новизна

1. Проведено теоретическое исследование дисперсионных характеристик электромагнитных волн с частотами, близкими к электронной циклотронной частоте, на основе анализа дисперсионного уравнения, записанного в приближении «холодной» и «тёплой» магнитоактивной плазмы. Обнаружено, что учёт тепловых поправок в данном уравнении приводит к качественному изменению формы волновых поверхностей в указанном диапазоне частот.
2. На крупномасштабной плазменной установке в условиях нестационарного магнитного поля проведено лабораторное исследование особенностей распространения электромагнитного излучения в магнитоактивной плазме на частотах в окрестности электронно-циклотронного резонанса.
3. Предложена модель распространения циклотронного излучения в магнитосферах ряда планет Солнечной системы и его выхода в космическое пространство через существенно неоднородную плазму. Выдвинуто предположение, что источник аврорального километрового радиоизлучения Земли расположен не в области минимальной концентрации плазмы (каверне), а в фоновой, относительно плотной плазме.
4. Рассмотрены особенности работы резонансного СВЧ-зонда в магнитоактивной плазме, ориентированного вдоль внешнего магнитного поля. Обнаружено наличие резонансных откликов измерительной системы при частоте сигнала как больше, так и меньше собственной частоты зонда в вакууме. Показана возможность определения концентрации плазмы без использования данных о магнитном поле.
5. Развита и экспериментально реализована методика измерения параметров магнитоактивной плазмы с помощью резонансного СВЧ-зонда, ориентированного вдоль внешнего магнитного поля. Установлено, что резонансные частоты зонда определяются показателем преломления для необыкновенной волны. Для измерения концентрации плазмы независимо от влияния магнитного поля на систему реализован метод третьей гармоники резонатора. Продемонстрирована возможность определения напряжённости внешнего магнитного поля с точностью менее 1% по спаду амплитуды резонансного

отклика зонда при частоте подводимого сигнала в окрестности электронно-циклотронного резонанса.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты проведённого лабораторного моделирования дают новое представление о процессах распространения циклотронного излучения в магнитосферах ряда планет Солнечной системы и, в частности, позволяют уточнить картину выхода аврорального километрового радиоизлучения Земли и декаметрового радиоизлучения Юпитера в космическое пространство через существенно неоднородную плазму.

Экспериментальная проверка результатов теоретического анализа указывает на принципиальную возможность исследования дисперсионных характеристик электромагнитных волн на частотах вблизи электронно-циклотронного резонанса с использованием волновых поверхностей, построенных в приближении «тёплой» магнитоактивной плазмы.

По результатам теоретического исследования особенностей работы резонансного СВЧ-зонда, погружённого в магнитоактивную плазму и ориентированного вдоль внешнего магнитного поля, обнаружена возможность определения концентрации плазмы без дополнительных измерений магнитного поля.

В ходе лабораторных экспериментов с помощью резонансного СВЧ-зонда удалось определить величину напряжённости внешнего магнитного поля с достаточно высокой точностью (менее 1%). В качестве независимого способа измерения концентрации плазмы успешно реализован метод третьей гармоники резонатора, который позволяет пренебречь влиянием магнитного поля на резонансные отклики системы. Таким образом, с помощью одного зонда удалось измерить концентрацию плазмы в широком диапазоне значений, охватывающем почти пять порядков. В целом, результаты лабораторных экспериментов демонстрируют высокую чувствительность СВЧ-зонда к параметрам магнитоактивной плазмы и внешнего магнитного поля.

В настоящей диссертационной работе также показано, что увеличение амплитуды подводимого к зонду сигнала приводит к появлению нелинейных эффектов, которые влияют на достоверность результатов измерений параметров плазмы, и поэтому особо отмечено, что в ходе лабораторных экспериментов крайне важно контролировать форму резонансной кривой, которая в линейном режиме работы СВЧ-зонда должна оставаться симметричной.

Положения, выносимые на защиту

1. Основной поток энергии электромагнитного излучения в магнитоактивной плазме с частотами вблизи электронно-циклотронного резонанса направлен перпендикулярно внешнему магнитному полю.
2. Амплитуда электромагнитного излучения с частотами в окрестности электронно-циклотронного резонанса сильно зависит от концентрации плазмы вблизи излучателя. Максимальная амплитуда наблюдается при плазменной частоте $\omega_p \sim (0.1-0.3)\omega_H$.
3. Источник аврорального километрового радиоизлучения Земли расположен вблизи каверны с пониженной концентрацией электронов, в более плотной фоновой плазме.
4. Резонансные отклики СВЧ-зонда в магнитоактивной плазме, ориентированного вдоль внешнего магнитного поля, наблюдаются при частоте подводимого сигнала как больше, так и меньше собственной частоты зонда в вакууме. Резонансные частоты измерительной системы подобного типа определяются показателем преломления для необыкновенной волны.
5. Наличие двух резонансных откликов СВЧ-зонда на разных частотах при одинаковых параметрах окружающей среды позволяет определить концентрацию магнитоактивной плазмы без дополнительных измерений магнитного поля.
6. Уменьшение амплитуды резонансного отклика СВЧ-зонда при частотах подводимого сигнала вблизи электронно-циклотронного резонанса позволяет определить электронную гирочастоту с точностью менее 1%.
7. С помощью метода третьей гармоники резонатора можно провести достоверные измерения концентрации магнитоактивной плазмы, пренебрегая влиянием магнитного поля на измерительную систему.

Методы исследования и степень достоверности результатов

Лабораторное моделирование процессов распространения электромагнитного излучения в рамках настоящей диссертационной работы проводилось на крупномасштабном плазменном стенде «Ионосфера». Большие размеры вакуумной камеры позволяли проводить исследования волновых процессов в приближении «безграничной» плазмы. Работа установки осуществлялась в импульсном режиме, что позволяло выполнять эксперименты в «спокойной» распадающейся плазме после выключения плазмосоздающего генератора. Высокая повторяемость основных параметров плазмы и магнитного поля от импульса к импульсу и, как следствие, хорошая воспроизводимость результатов обеспечивали возможность проведения измерений параметров исследуемых волновых процессов с высоким пространственно-временным разрешением.

Широкий диапазон изменения параметров плазмы и магнитного поля в течение одного цикла работы установки позволял исследовать процессы распространения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме в самых различных условиях. Высокая степень достоверности получаемых результатов достигалась путём использования надёжных и хорошо апробированных методов диагностики, а также с помощью частично дублирующих друг друга методик, что позволяло в ходе экспериментов сравнивать результаты различных измерений.

В рамках теоретического анализа дисперсионных характеристик электромагнитного излучения с частотами, близкими к электронной циклотронной частоте, рассматривались дисперсионные соотношения для волн в приближении «холодной» и «тёплой» магнитоактивной плазмы, которые представляют собой соответственно уравнения четвёртой и шестой степени для показателя преломления. На основе данных уравнений были построены волновые поверхности вблизи электронно-циклотронного резонанса, которые позволяют наглядно определить, с каким волновым вектором может распространяться волна в магнитоактивной плазме и куда при этом направлен поток её энергии. Достоверность результатов данного исследования обеспечивалась путём использования математического пакета MATLAB для графических построений с высокой точностью. В целом, результаты лабораторных экспериментов и теоретического анализа, полученные в рамках настоящей диссертационной работы, находятся в достаточно хорошем соответствии друг с другом.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в настоящей диссертационной работе, получены автором лично либо при его непосредственном участии. Теоретическое исследование особенностей распространения электромагнитного излучения в магнитоактивной плазме на частотах вблизи электронно-циклотронного резонанса, основанное на анализе дисперсионного уравнения для собственных волн, было проведено лично автором. Помимо этого, автор принимал активное участие в планировании и проведении лабораторных экспериментов, при этом его роль в обработке и физической интерпретации полученных данных была определяющей. Все диагностические системы, которые использовались в ходе экспериментов, разработаны при содействии автора. Также автор внёс существенный вклад в подготовку к публикации полученных результатов, при этом основная часть из них была представлена на семинарах и научных конференциях лично автором.

Публикации и апробация результатов

По результатам проведённого исследования опубликовано 11 научных работ, включая 3 статьи в рецензируемых журналах [1А-3А], 1 статья в сборнике трудов международной конференции [10А] и 7 тезисов докладов [4А-9А,11А]. Основные результаты работы были представлены на следующих российских и международных конференциях: XXII и 24 Нижегородские сессии молодых учёных (Нижний Новгород, 2017 г., 2019 г.); тринадцатая, пятнадцатая и семнадцатая ежегодные конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, 2018 г., 2020 г., 2022 г.); XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2019 г.); The 4th COSPAR Symposium «Small satellites for sustainable Science and Development» (Herzliya, Israel, 2019); Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2020 (Казань, 2020 г.); Четвёртый Российский симпозиум по наноспутникам с международным участием «RusNanoSat-2021» (Самара, 2021 г.); 5-я международная научно-техническая конференция имени О.В. Лосева «Современная элементная база радиоэлектроники и её применение» (Нижний Новгород, 2021 г.).

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, который содержит 96 наименований. Общий объём диссертационной работы составляет 64 страницы, включая 32 рисунка.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели исследования и рассмотрена его научная новизна. Помимо этого, представлены основные положения, выносимые на защиту, и приведён список публикаций по теме исследования. В конце кратко изложено содержание диссертационной работы.

В **главе 1** представлено описание установки, на которой проводились экспериментальные исследования в рамках настоящей диссертации. В **разделе 1.1** рассмотрены основные принципы лабораторного моделирования волновых процессов в космической плазме, а также условия, которым должны соответствовать экспериментальные установки, предназначенные для подобного моделирования. Показано, что возможность полного масштабного моделирования плазменных явлений основывается на законах подобия, которые определяют соотношения между основными безразмерными физическими величинами в исследуемом космическом объекте и в

его лабораторном аналоге. Ключевым предположением является инвариантность невозмущённых скоростей всех физических объектов, составляющих рассматриваемую систему. Представлены условия, при которых допускается ограниченное лабораторное моделирование. Приведены требования к характерным масштабам экспериментальных установок для проведения исследований процессов распространения волн в приближении «безграничной» плазмы.

В разделе 1.2 содержится описание крупномасштабного плазменного стенда «Ионосфера». Приведены размеры вакуумной камеры и основные характеристики индукционного ВЧ-разряда, с помощью которого создавалась плазма. Рассмотрены условия проведения экспериментов. Описаны процессы распада плазмы и релаксации электронной температуры. В целом, широкий диапазон изменения параметров плазмы и магнитного поля, а также достаточно большие размеры плазменного столба позволили провести полноценное экспериментальное исследование процессов распространения волн с частотами в окрестности электронно-циклотронного резонанса.

В разделе 1.3 рассматривается принцип работы резонансного СВЧ-зонда в изотропной плазме, выполненного на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии. Представлены основные особенности данной измерительной системы. Описана методика измерения концентрации нестационарной (распадающейся) плазмы. Для нахождения достаточно низких значений концентрации применялся амплитудно-фазовый метод.

В разделе 1.4 приведено описание систем для возбуждения и регистрации высокочастотных электромагнитных полей. Представлены характерные размеры антенн, а также их схематическое изображение. Конструкция экспериментальной установки позволяла размещать антенны в любых сечениях вакуумной камеры и на любых расстояниях от центральной оси.

Глава 2 посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию особенностей распространения аврорального километрового радиоизлучения Земли и декаметрового радиоизлучения Юпитера. В разделе 2.1 содержится описание основных свойств аврорального километрового радиоизлучения Земли. В частности, указаны его характерные частоты, которые соответствуют локальной гирочастоте электронов. Источники данного излучения расположены в авроральной магнитосфере в областях с пониженной концентрацией плазмы (кавернах). Приведены характерные пространственные масштабы каверн, которые представляют собой вытянутые плазменные неоднородности, формирующие своеобразный волновод. Также рассмотрен ряд важных вопросов, связанных с некоторыми особенностями генерации и распространения АКР, которые до сих пор не имеют объяснения.

В разделе 2.2 представлены основные свойства декаметрового радиоизлучения Юпитера. Данное излучение состоит из шумовых бурь, длительность которых может составлять от

нескольких минут до нескольких часов. Декаметровое радиоизлучение разделено на два типа (L и S), которые отличаются между собой в первую очередь характерными временными масштабами. Показано, что ключевую роль в формировании данного излучения играет электромагнитное взаимодействие между Юпитером и его спутником Ио, соединёнными друг с другом так называемой трубкой Ио. Также продемонстрирована определённая зависимость появления S-всплесков Юпитера от положения спутника Ио на его орбите.

В разделе 2.3 проводится теоретическое исследование особенностей распространения излучения в магнитоактивной плазме на частотах вблизи электронно-циклотронного резонанса. Показано, что дисперсионное соотношение, записанное в «холодном» («тёплом») приближении, представляет собой биквадратное (бикубическое) уравнение для показателя преломления. Рассмотрены условия его применимости. На основе данных уравнений можно построить волновые поверхности, которые позволяют наглядно определить направление групповой скорости любой электромагнитной волны, которая способна распространяться в магнитоактивной плазме. Учёт тепловых поправок в дисперсионном уравнении приводит к качественному изменению формы волновых поверхностей в окрестности электронно-циклотронного резонанса (рисунок 1). В результате теоретического анализа установлено, что энергия электромагнитного излучения на частотах, близких к электронной циклотронной частоте, распространяется преимущественно поперёк внешнего магнитного поля.

В разделе 2.4 приведены результаты лабораторных экспериментов и их обсуждение. По итогам экспериментального исследования установлено, что основной поток излучения в магнитоактивной плазме на частотах в окрестности электронно-циклотронного резонанса направлен перпендикулярно силовым линиям внешнего магнитного поля. Помимо этого, обнаружено, что максимальная амплитуда циклотронного излучения наблюдается при некотором оптимальном соотношении частот $\omega_p/\omega_H \sim (0.1-0.3)$. В более плотной плазме амплитуда существенно уменьшается. На основании полученных результатов сделано предположение, что источник аврорального километрового радиоизлучения расположен не в области пониженной концентрации плазмы (каверне), а в фоновой, относительно плотной плазме.

В разделе 2.5 приведены основные выводы второй главы. Материалы, представленные в данной главе, опубликованы в работах [2А,4А-9А].

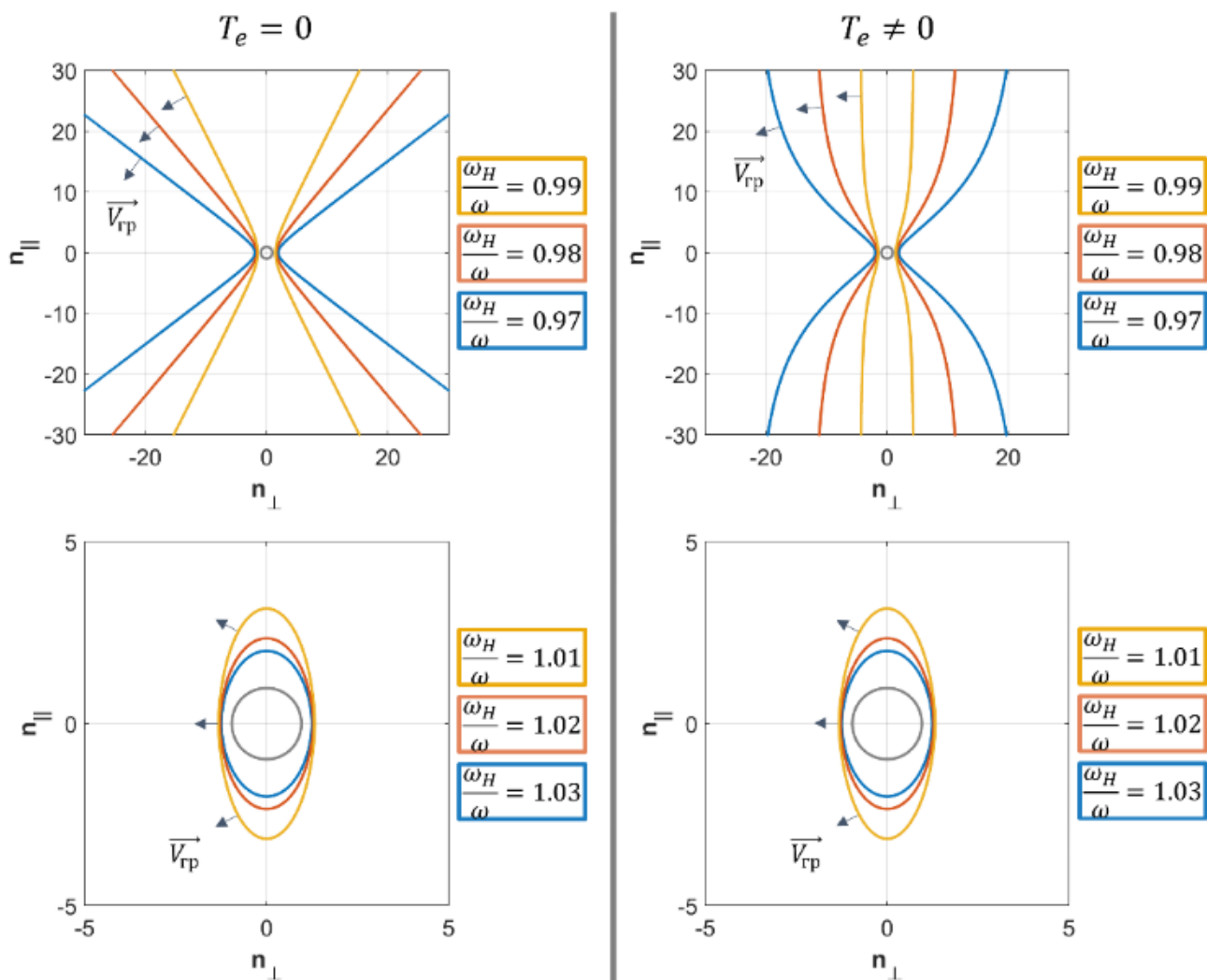


Рисунок 1 — Волновые поверхности вблизи электронно-циклотронного резонанса, построенные в приближении «холодной» (слева) и «тёплой» (справа) магнитоактивной плазмы. Серым цветом обозначена поверхность для обыкновенной моды, другими цветами — для необыкновенной моды. Различные цвета поверхностей соответствуют различным соотношениям ω_H/ω (приведены справа от каждого рисунка). В расчётах использовался параметр пространственной дисперсии $\beta_{Te}^2 = 10^{-6}$

Глава 3 посвящена исследованию диагностических возможностей резонансного СВЧ-зонда в магнитоактивной плазме. В **разделе 3.1** рассмотрены особенности работы зонда в магнитоактивной плазме, ориентированного вдоль внешнего магнитного поля. Получено выражение, связывающее плазменную и циклотронную частоту электронов, а также резонансную частоту СВЧ-зонда. Показано, что для необыкновенной волны резонанс в измерительной системе возможен при частоте подводимого сигнала f как больше, так и меньше собственной частоты зонда в вакууме f_0 (рисунок 2). Помимо этого, установлена возможность определения концентрации плазмы без использования данных о магнитном поле.

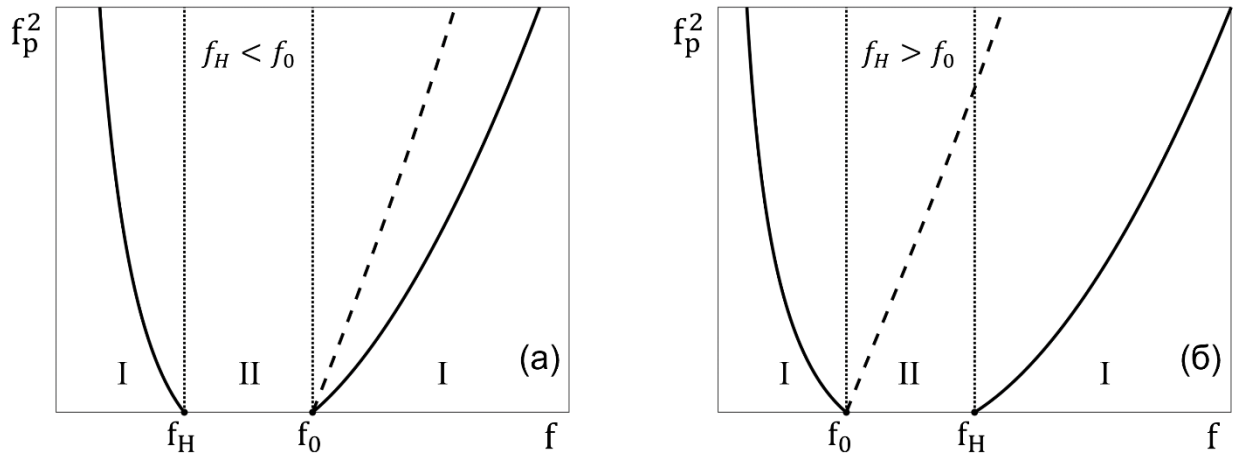


Рисунок 2 — Теоретический график зависимости квадрата плазменной частоты f_p^2 от частоты f для обыкновенной (пунктирная линия) и необыкновенной (сплошная линия) волн при двух значениях электронной циклотронной частоты: (а) $f_H < f_0$; (б) $f_H > f_0$. Римскими цифрами обозначены: I – области частот $f_1 < \min\{f_H, f_0\}$ и $f_2 > \max\{f_H, f_0\}$; II – области частот $\min\{f_H, f_0\} < f < \max\{f_H, f_0\}$

В разделе 3.2 приведены результаты лабораторных экспериментов и их обсуждение. В ходе исследования частота подводимого сигнала варьировалась в широком диапазоне, который охватывал области как больше, так и меньше «вакуумной» частоты зонда. Установлено, что резонансные частоты СВЧ-зонда в магнитоактивной плазме, ориентированного вдоль внешнего магнитного поля, определяются показателем преломления для необыкновенной волны. Также зафиксирован спад амплитуды резонансного отклика зонда при частотах сигнала в окрестности электронно-циклотронного резонанса (рисунок 3), что находится в полном соответствии с теоретическим графиком распределения резонансных частот системы. По данному спаду удалось определить электронную циклотронную частоту с точностью менее 1%. Помимо этого,

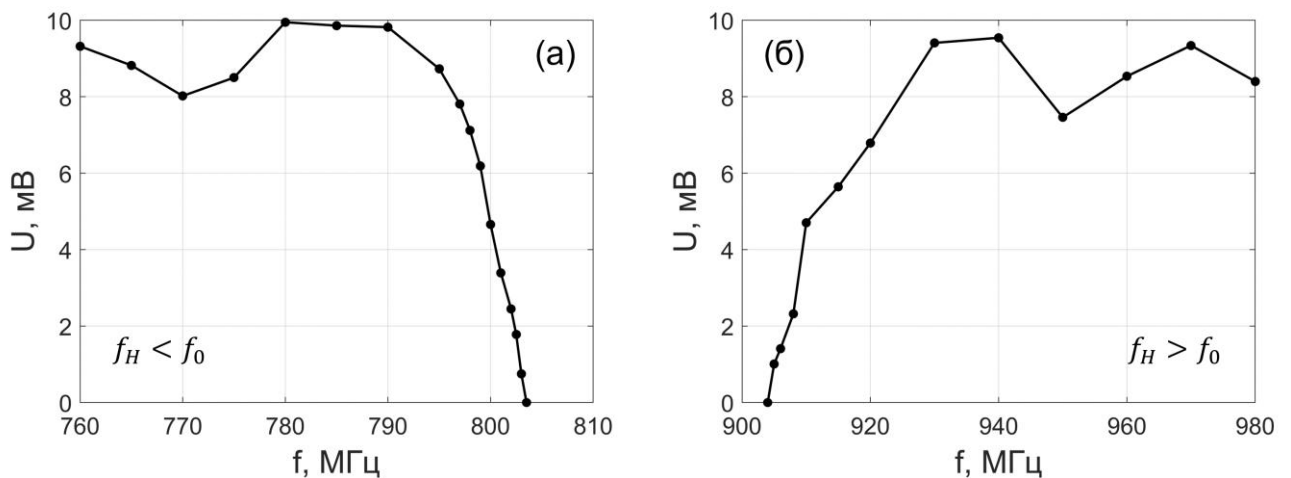


Рисунок 3 — Амплитуда резонанса U в зависимости от частоты подводимого к зонду сигнала f при двух значениях внешнего магнитного поля H : (а) $f_H < f_0$; (б) $f_H > f_0$

проведено исследование особенностей излучения СВЧ-зонда на частотах в окрестности электронно-циклотронного резонанса. Обнаружено, что электромагнитные волны с такими частотами распространяются преимущественно поперёк внешнего магнитного поля. Также построен график зависимости концентрации распадающейся плазмы от времени с использованием резонансных частот СВЧ-зонда как меньше, так и больше его «вакуумной» частоты (рисунок 4). Найденные значения концентрации находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными независимым способом, в качестве которого реализован метод третьей гармоники резонатора и который позволяет пренебречь влиянием магнитного поля на резонансные отклики измерительной системы. Общий диапазон измеренных значений

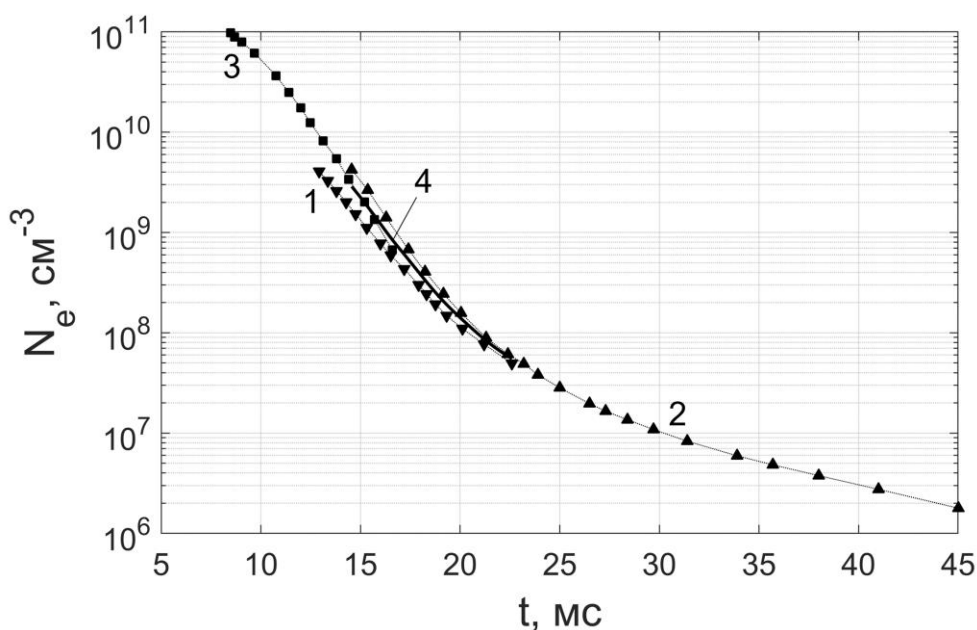


Рисунок 4 — Зависимость концентрации плазмы N_e от времени t . Значения концентрации вычислены различными способами: 1,2 – с помощью резонансных частот $f_1 < f_0$ и $f_2 > f_0$ соответственно; 3 – с помощью метода третьей гармоники резонатора; 4 – при одновременной обработке резонансных частот f_1 и f_2 без использования данных о магнитном поле (сплошная линия на рисунке)

концентрации составил почти пять порядков. Помимо этого, показано, что в условиях распадающейся плазмы и спадающего во времени магнитного поля возможно появление сразу двух резонансных откликов измерительной системы при одной и той же частоте подаваемого на зонд сигнала, что обусловлено немонотонным изменением показателя преломления во времени. Продемонстрирована динамика двух резонансных кривых на осциллограмме при увеличении частоты сигнала вплоть до электронной циклотронной частоты. В конце раздела приведены результаты исследования нелинейных эффектов, возникающих при увеличении мощности подводимого к зонду сигнала. В частности, обнаружено укрупнение переднего фронта

резонансной кривой, что является типичной особенностью нелинейной колебательной системы. Помимо этого, зафиксирован сдвиг максимума резонанса влево по временной шкале в сторону больших значений концентрации невозмущённой плазмы, что обусловлено изменением показателя преломления вследствие стрикционного воздействия на электроны пондеромоторной силы, причём преимущественно продольной компоненты. В результате отмечено, что в ходе экспериментов с использованием СВЧ-зонда необходимо контролировать форму резонансной кривой, которая должна оставаться симметричной. В противном случае результаты измерения параметров плазмы могут оказаться недостоверными.

В разделе 3.3 сформулированы основные выводы третьей главы. Материалы, представленные в данной главе, опубликованы в работах [1А,3А,10А,11А].

В заключении представлены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведённых в рамках настоящей диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. В ходе теоретического анализа дисперсионного уравнения для собственных волн в магнитоактивной плазме установлено, что подавляющее большинство возбуждаемых волн на частотах в окрестности электронно-циклотронного резонанса являются квазипродольными, основной поток энергии которых направлен преимущественно поперёк силовых линий внешнего магнитного поля. Результаты лабораторных экспериментов также показывают, что максимум диаграммы направленности антенны в магнитоактивной плазме на частотах, близких к электронной циклотронной частоте, ориентирован в перпендикулярном направлении относительно локального магнитного поля.
2. Амплитуда электромагнитного излучения с частотами в окрестности электронно-циклотронного резонанса сильно зависит от концентрации плазмы вблизи излучателя. Максимальная амплитуда наблюдается при некоторых оптимальных значениях концентрации, соответствующих плазменной частоте $\omega_p \sim (0.1-0.3)\omega_H$. В более плотной плазме при условии $\omega_p \sim \omega_H \sim \omega$ отмечается падение уровня принимаемого сигнала практически до нуля вследствие увеличения эффективности циклотронного поглощения электромагнитного излучения.
3. На основании полученных результатов выдвинуто предположение, что источник аврорального километрового радиоизлучения Земли расположен не внутри области с пониженной концентрацией плазмы, а в более плотной фоновой плазме. Проникновение

данного излучения внутрь каверны происходит в результате его прохождения через область с градиентом концентрации плазмы перпендикулярно локальному магнитному полю. Дальнейший выход АКР в открытое пространство под малым углом к направлению магнитного поля обусловлен процессами рефракции волн на плазменных неоднородностях.

4. В результате экспериментального исследования диагностических возможностей резонансного СВЧ-зонда в магнитоактивной плазме, ориентированного вдоль внешнего магнитного поля, обнаружено, что резонансные отклики данной системы наблюдаются при частоте подводимого сигнала как больше, так и меньше собственной частоты зонда в вакууме. Помимо этого, установлено, что резонансные частоты измерительной системы подобного типа определяются показателем преломления для необыкновенной волны.
5. В ходе экспериментов зафиксирован спад амплитуды резонансного отклика СВЧ-зонда при частотах подводимого сигнала вблизи электронно-циклотронного резонанса. Данная особенность позволила определить электронную циклотронную частоту в момент исчезновения резонанса с точностью менее 1%.
6. С помощью СВЧ-зонда удалось измерить концентрацию магнитоактивной плазмы в широком диапазоне значений (почти пять порядков). В качестве независимого способа измерения концентрации реализован метод третьей гармоники резонатора, который позволяет пренебречь влиянием магнитного поля на резонансные отклики системы. Значения концентрации, найденные с использованием резонансных частот как меньше, так и больше «вакуумной» частоты зонда, находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными независимым способом. Более точное совпадение удалось получить при одновременной обработке резонансных частот из разных областей без использования данных о магнитном поле.
7. При увеличении амплитуды подводимого к СВЧ-зонду сигнала наблюдается укрупнение переднего фронта резонансной кривой и сдвиг максимума резонанса по временной шкале. Данная особенность связана с изменением показателя преломления плазмы вследствие стрикционного воздействия продольной компоненты пондеромоторной силы Миллера на заряженные частицы вблизи измерительных проводов резонатора. Подобные нелинейные эффекты могут приводить к ошибкам измерений параметров плазмы, поэтому в ходе экспериментов крайне важно контролировать форму резонансной кривой, которая должна оставаться симметричной.

Список цитированной литературы

1. Результаты измерений интенсивности радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц при помощи аппаратуры, установленной на спутнике «ЭЛЕКТРОН-2» / Е.А. Бенедиктов, Г.Г. Гетманцев, Н.А. Митяков [и др.] // Исследования космического пространства. – 1965. – С. 581-606.
2. Calvert, W. The auroral plasma cavity / W. Calvert // *Geophysical Research Letters*. – 1981. – Vol. 8, No. 8. – P. 919-921.
3. Louarn, P. Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities — II. The cyclotron maser instability in small size sources / P. Louarn, D. Le Queau // *Planetary and Space Science*. – 1996. – Vol. 44, No. 3. – P. 211-224.
4. Об источнике аврорального километрового излучения / М.М. Могилевский, Т.В. Романцова, Я. Ханаш [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. – 2007. – Т. 86, вып. 11. – С. 819-821.
5. Pritchett, P.L. Relativistic dispersion, the cyclotron maser instability, and auroral kilometric radiation / P.L. Pritchett // *Journal of Geophysical Research*. – 1984. – Vol. 89, No. A10. – P. 8957-8970.
6. Cyclotron maser radiation from inhomogeneous plasmas / R.A. Cairns, I. Vorgul, R. Bingham [et al.] // *Physics of Plasmas*. – 2011. – Vol. 18, No. 2. – P. 022902-5.
7. Simultaneous radio and optical observations of auroral structures: implications for AKR beaming / J.D. Menietti, R.L. Mutel, I.W. Christopher [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. – 2011. – Vol. 116, No. 12. – P. A12219.
8. Omidi, N. Path-integrated growth of auroral kilometric radiation // N. Omidi, D.A. Gurnett // *Journal of Geophysical Research*. – 1984. – Vol. 89, No. A12. – P. 10801-10812.
9. Calvert, W. A feedback model for the source of auroral kilometric radiation / W. Calvert // *Journal of Geophysical Research*. – 1982. – Vol. 87, No. 10. – P. 8199-8214.
10. Zarka, P. Auroral radio emissions at the outer planets: observations and theories / P. Zarka // *Journal of Geophysical Research*. – 1998. – Vol. 103, No. E9. – P. 20159-20194.
11. Burke, B.F. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter / B.F. Burke, K.L. Franklin // *Journal of Geophysical Research*. – 1955. – Vol. 60, No. 2. – P. 213-217.
12. Рябов, Б.П. Декаметровое радиоизлучение Юпитера. II. Локализация области S-излучения / Б.П. Рябов // *Астрономический вестник*. – 1986. – Т. 20, № 1. – С. 20-34.
13. Hewitt, R.G. Electron cyclotron maser emission near the cutoff frequencies / R.G. Hewitt, D.B. Melrose // *Australian Journal of Physics*. – 1983. – Vol. 36, No. 5. – P. 725-743.

14. Юпитер. I. Происхождение и внутреннее строение. Спутники / под ред. Т. Герелса. – Москва: Мир, 1978. – 522 с.
15. Юпитер. III. Магнитосфера. Радиационные пояса / под ред. Т. Герелса. – Москва: Мир, 1979. – 437 с.
16. Stenzel, R.L. Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasmas / R.L. Stenzel // Review of Scientific Instruments. – 1976. – Vol. 47, No. 5. – P. 603-607.
17. Electron neutral collision frequency measurement with the hairpin resonator probe / D.J. Peterson, P. Kraus, T.C. Chua [et al.] // Plasma Sources Science and Technology. – 2017. – Vol. 26, No. 9. – P. 095002-8.
18. Two-wire microwave resonator probe / I.G. Kondrat'ev, A.V. Kostrov, A.I. Smirnov [et al.] // Plasma Physics Reports. – 2002. – Vol. 28, No. 11. – P. 900-905.
19. Diagnostics of plasma density nonstationary perturbations / D.V. Yanin, A.V. Kostrov, A.I. Smirnov, A.V. Strikovskiy // Technical Physics. – 2008. – Vol. 53, No. 1. – P. 129-133.
20. Diagnostics of the atmospheric-pressure plasma parameters using the method of near-field microwave sounding / D.V. Yanin, A.V. Kostrov, A.I. Smirnov [et al.] // Technical Physics. – 2012. – Vol. 57, No. 4. – P. 468-477.
21. Gogna, G.S. Microwave resonances of a hairpin probe in a magnetized plasma / G.S. Gogna, S.K. Karkari // Applied Physics Letters. – 2010. – Vol. 96, No. 15. – P. 151503-3.
22. Gogna, G.S. Interpreting the behavior of a quarter-wave transmission line resonator in a magnetized plasma / G.S. Gogna, S.K. Karkari, M.M. Turner // Physics of Plasmas. – 2014. – Vol. 21, No. 12. – P. 123510-8.
23. Performance of a floating hairpin probe in strongly magnetized plasma / S.K. Karkari, G.S. Gogna, D. Boilson [et al.] // Contributions to Plasma Physics. – 2010. – Vol. 50, No. 9. – P. 903-908.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1А. Galka A.G., Yanin D.V., Kostrov A.V., Priver S.E., Malyshev M.S. Wide-range measurements of plasma density using a hairpin resonance microwave probe // Journal of Applied Physics. 2019. V. 125, No. 12. Art. no. 124501.
- 2А. Малышев М.С., Назаров В.В., Костров А.В., Галка А.Г. Особенности распространения волн в неоднородной плазме в окрестности электронно-циклотронного резонанса // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110, вып. 4. С. 237-240.

- 3А. Галка А.Г., Малышев М.С., Костров А.В. Диагностические возможности метода резонансного СВЧ-зонда для исследования параметров нестационарной магнитоактивной плазмы (*отправлено в журнал «Известия вузов. Радиофизика»*).
- 4А. Малышев М.С., Назаров В.В., Костров А.В. Лабораторное исследование распространения волн в магнитоактивной плазме в окрестности ЭЦР // XXII Нижегородская сессия молодых учёных. Естественные, математические науки: материалы докладов. 2017. С. 57.
- 5А. Костров А.В., Малышев М.С., Назаров В.В. Исследование распространения волн в магнитоактивной плазме в окрестности ЭЦР // Сборник тезисов докладов тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». 2018. С. 66.
- 6А. Назаров В.В., Малышев М.С., Костров А.В. Исследование распространения волн в магнитоактивной плазме в окрестности электронно-циклотронного резонанса // Сборник тезисов докладов XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 2019. С. 192.
- 7А. Малышев М.С., Назаров В.В., Костров А.В., Галка А.Г. Исследование распространения волн в магнитоактивной плазме в окрестности электронно-циклотронного резонанса // 24 Нижегородская сессия молодых учёных (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. 2019. С. 100-101.
- 8А. Галка А.Г., Костров А.В., Малышев М.С. Захват ЭЦР волн в каверну с пониженной плотностью плазмы, вытянутую вдоль внешнего магнитного поля // Сборник тезисов докладов пятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». 2020. С. 95.
- 9А. Малышев М.С., Костров А.В., Галка А.Г. Исследование особенностей распространения электромагнитного излучения в плазме на частотах близких к электронно-циклотронному резонансу // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2020: сборник тезисов. 2020. С. 130-131.
- 10А. Галка А.Г., Костров А.В., Малышев М.С. Диагностика электродинамических параметров материальных сред ближнепольными резонансными измерительными системами // Труды 5-ой международной научно-технической конференции имени О.В. Лосева «Современная элементная база радиоэлектроники и её применение». 2021. С. 21-26.
- 11А. Галка А.Г., Малышев М.С., Костров А.В. Развитие метода резонансного СВЧ-зонда в диагностике параметров магнитоактивной плазмы // Сборник тезисов докладов семнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». 2022. С. 172.

Оглавление диссертационной работы

Введение	3
Глава 1. Описание экспериментальной установки и методов диагностики	16
1.1 Особенности лабораторного моделирования волновых процессов в космической плазме	17
1.2 Экспериментальный стенд «Ионосфера»	19
1.3 Резонансный СВЧ-зонд для определения плотности плазмы.....	21
1.4 Системы для возбуждения и регистрации высокочастотных электромагнитных полей....	23
Глава 2. Исследование особенностей распространения аврорального километрового радиоизлучения Земли и декаметрового радиоизлучения Юпитера.....	25
2.1 Основные свойства аврорального километрового радиоизлучения Земли	25
2.2 Основные свойства декаметрового радиоизлучения Юпитера	29
2.3 Дисперсионные характеристики волн вблизи электронно-циклотронного резонанса	32
2.4 Результаты лабораторных экспериментов и их обсуждение	37
2.5 Выводы.....	41
Глава 3. Исследование диагностических возможностей СВЧ-зонда в магнитоактивной плазме	42
3.1 Особенности работы зонда в магнитоактивной плазме	42
3.2 Результаты лабораторных экспериментов и их обсуждение	44
3.3 Выводы.....	54
Заключение.....	55
Список литературы.....	57