

На правах рукописи



Бареев Денис Дамирович

**Кинетический анализ процессов излучения и
бесстолкновительного поглощения волн в движущейся замагниченной
плазме и возмущенной ионосфере**

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им Н.И. Лобачевского».

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор
Гавриленко Владимир Георгиевич,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И.
Лобачевского».

Официальные оппоненты: **Анютин Александр Павлович**,
доктор физико-математических наук, доцент
Фрязинский филиал Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, ведущий научный сотрудник

Заборонкова Татьяна Михайловна,
доктор физико-математических наук, профессор
ФГБОУ высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им.
Р.Е. Алексеева»

Ведущая организация: ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии
наук»

Защита состоится «2» октября 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета
Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского
по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 1, аудитория 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте
<https://diss.unn.ru/files/2019/934/diss-Bareev-934.pdf>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д 212.166.07,

к.ф.-м.н., доцент



Клюев Алексей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Вопросы излучения и поглощения волн в магнитоактивной плазме изучаются в течение длительного времени, и основные результаты вошли в монографии и учебники. Несмотря на большое число работ по этой теме, ряд теоретических вопросов ещё требует дополнительного исследования. Одной из сложных задач этого направления является расчёт бесстолкновительного затухания электромагнитных волн при их взаимодействии с частицами плазмы, известного как затухание Ландау [1]. В настоящее время широко известно, что в случае сильного взаимодействия аналитическое решение задачи затруднено.

Сильное взаимодействие имеет место, в частности, при распространении в плазме медленных волн, фазовая скорость которых близка к скорости движения значительного числа частиц. Такая ситуация может быть реализована за счёт макроскопического движения плазмы. В работах [2, 3] показано, что в однородно движущейся вдоль сильного внешнего магнитного поля плазме поле излучения неподвижного монохроматического источника в волновой зоне локально представляет собой суперпозицию нескольких квазиплоских волн с различными волновыми векторами, групповая скорость которых направлена от источника в точку наблюдения. Среди тех из них, групповая скорость которых направлена под малым углом к магнитному полю, есть такие, у которых фазовая скорость вдоль потока близка к средней скорости плазмы. При этом условие фазового синхронизма выполняется в протяжённой области пространства в отличие от случая плоскостростного неоднородного течения магнитоактивной плазмы, когда при наклонном падении на слой медленной волны фазовый синхронизм волны с потоком имеет место только в относительно тонком слое. Поскольку в работах [4, 5] показано, что в плавнонеоднородном потоке замагниченной плазмы падающая волна сильно поглощается в ограниченной области фазового синхронизма при отсутствии столкновений электронов, естественно предположить, что при излучении источника в однородной движущейся магнитоактивной плазме квазисинхронные волны будут также испытывать сильное бесстолкновительное затухание. Для его расчёта нельзя ограничиваться приближением холодной движущейся плазмы, использованным в работах [2, 3]. Необходимо корректно учесть влияние теплового движения электронов плазмы. Решение этого вопроса представляет как общефизический, так и практический интерес, так как быстрые, в некоторых случаях релятивистские, потоки плазмы реализуются, например, в космических условиях, где существуют достаточно сильные магнитные поля. Движение межзвёздной, межпланетной, а также магнитосферной плазмы может оказывать достаточно существенное влияние

на распространение радиоизлучения в процессе космической радиосвязи. Примерами быстро движущейся среды могут служить также плазма в лабораторных установках, МГД - генераторах, плазменных ускорителях.

В работе [6] показано, что электромагнитное поле излучения в волновой зоне монохроматического источника с заданным распределением тока может быть успешно рассчитано с использованием известной леммы Лоренца [7, 8] для квазиплоских волновых полей. В статье [6] также указано на то, что в случае среды с пространственной дисперсией формулировка леммы Лоренца должна быть изменена. В этой же работе выполнено соответствующее уточнение леммы Лоренца на основе феноменологического метода учёта слабой пространственной дисперсии. Поскольку движущаяся плазма даже в холодном приближении является средой с пространственной дисперсией, для успешного расчёта амплитуд полей излучения в ней необходимо обобщить формулировку леммы Лоренца на случай сред с произвольной пространственной дисперсией. Такое обобщение является актуальным и для решения других задач излучения электромагнитных волн в различных средах с пространственной дисперсией.

Другой причиной существования сильного бесстолкновительного взаимодействия волн с частицами является циклотронное поглощение вблизи гармоник гирочастоты в магнитоактивной плазме. Оно подробно исследовано в связи с решением астрофизических задач (смотри, например, [9] и цитированную там литературу).

В последние годы установлено, что бесстолкновительное циклотронное поглощение определяет декременты затухания квазипотенциальных плазменных волн, генерируемых в области верхнегибридного резонанса при воздействии на ионосферу Земли мощной электромагнитной волны накачки [10]. Экспериментальное определение зависимости декрементов затухания от частоты накачки вблизи четвёртой гармоники гирочастоты основывается на измерении времени релаксации принимаемого искусственного радиоизлучения, которое образуется в результате рассеяния плазменных волн на неоднородностях концентрации ионосферной плазмы [10]. Для выяснения вопроса о том, какие плазменные волны ответственны за возбуждение искусственного радиоизлучения, нужно теоретически рассчитать зависимость их декрементов затухания от частоты и параметров этих волн и сравнить рассчитанную частотную зависимость с измеренной зависимостью времени затухания наблюдаемого искусственного радиоизлучения от частоты. При таком теоретическом расчёте необходимо корректно учитывать тепловое движение электронов плазмы.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является выяснение влияния резонансного взаимодействия с электронами на свойства излучаемых в движущейся сильно замагниченной плазме электромагнитных волн и на циклотронное затухание верхнегибридных плазменных волн в ионосфере Земли.

Задачи работы:

1. Обобщение леммы Лоренца для квазимонохроматических квазиплоских электромагнитных волновых полей на случай сред с произвольной пространственной дисперсией.
2. Кинетический расчёт дисперсионных кривых и поля излучения монохроматического электрического диполя в движущейся сильно замагниченной плазме.
3. Кинетический расчёт волнового поля и сопротивления излучения антенны бегущей волны в движущейся сильно замагниченной плазме.
4. Кинетический расчёт зависимости декремента затухания верхнегибридных плазменных волн, возбуждаемых в ионосфере мощной электромагнитной волной, от частоты вблизи четвёртой гармоники гирочастоты.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались аналитические методы расчёта и численное решение дисперсионных уравнений.

Научная новизна

1. Впервые выполнено обобщение леммы Лоренца для квазимонохроматических квазиплоских электромагнитных волновых полей на случай сред с произвольной пространственной дисперсией.
2. Впервые исследовано кинетическим методом влияние теплового движения электронов на характеристики поля излучения монохроматического электрического диполя в движущейся сильно замагниченной плазме.
3. Впервые рассчитано волновое поле и сопротивления излучения антенны бегущей волны в движущейся сильно замагниченной плазме.
4. Впервые выполнен кинетический расчёт зависимости декремента затухания верхнегибридных плазменных волн, возбуждаемых в ионосфере мощной электромагнитной волной, от частоты вблизи четвёртой гармоники гирочастоты.

Научная и практическая значимость

Выведенная в диссертации обобщённая формулировка леммы Лоренца может быть использована при решении широкого круга задач электродинамики сред с пространственной дисперсией, включая вопросы возбуждения электромагнитных полей в волноводах, заполненных такой средой, и излучения заданных источников в диспергирующих средах. Изложение её содержания может быть включено в курсы лекций по электродинамике и специальные курсы для студентов высших учебных заведений.

Полученные результаты кинетического расчёта поля излучения электромагнитных волн в движущейся сильно замагниченной плазме имеют общезначимое значение для лучшего понимания влияния движения среды на характеристики излучения и процессы бесстолкновительного взаимодействия излучаемых волн с квазисинхронно движущимися частицами.

Предложенный в диссертации численный метод решения сложных дисперсионных уравнений может быть использован в научных разработках при расчёте полей излучения антенн в диспергирующих средах, в частности, в движущейся в естественных и лабораторных условиях плазме.

Сравнение результатов выполненного кинетического расчёта зависимости декремента затухания верхнегибридных плазменных волн, возбуждаемых в ионосфере мощной электромагнитной волной, от частоты вблизи четвёртой гармоники гирочастоты с измеренной зависимостью времени затухания наблюдаемого искусственного радиоизлучения от частоты позволяют выяснить, какие плазменные волны ответственны за возбуждение искусственного радиоизлучения. Этот результат важен для понимания физических процессов, происходящих в ионосфере Земли при воздействии мощного радиоизлучения, что необходимо для дальнейшего развития систем наземной и спутниковой радиосвязи. Решение этого вопроса актуально для разработки методов создания в ионосфере контролируемых возмущений с заданными параметрами, и для изучения возможностей управления космической погодой и дальним распространением радиоволн.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученного в диссертации обобщения леммы Лоренца подтверждается строгостью вывода и совпадением результатов расчёта на её основе поля излучения диполя в движущейся холодной замагниченной плазме с полученными другим известным методом.

Результаты кинетического расчёта затухания квазисинхронных с потоком волн, излучаемых в движущейся замагниченной плазме согласуются

с известными принципами бесстолкновительного взаимодействия волн и частиц.

Достоверность результатов кинетического расчёта зависимости декремента затухания верхнегибридных плазменных волн, возбуждаемых в ионосфере мощной электромагнитной волной, от частоты вблизи четвёртой гармоники гирочастоты подтверждается экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Выполненное в диссертации обобщение леммы Лоренца позволяет применять её для расчёта квазимонохроматических квазиплоских электромагнитных волновых полей в средах с произвольной пространственной дисперсией.

2. Поле излучения в волновой зоне монохроматического электрического диполя в движущейся сильно замагниченной плазме локально представляет собой суперпозицию нескольких квазиплоских волн. Их число зависит от угла наблюдения. При малом угле между внешним магнитным полем и направлением из точки наблюдения на источник две из них являются квазисинхронными с потоком и испытывают сильное бесстолкновительное затухание, обусловленное тепловым движением электронов.

3. Кинетический расчёт сопротивления излучения антенны бегущей волны в движущейся замагниченной плазме подтверждает вывод о наличии энергетического взаимодействия квазисинхронных с потоком излучаемых волн с электронами плазмы.

4. Сравнение результатов кинетического расчёта зависимости декремента затухания верхнегибридных плазменных волн, возбуждаемых в ионосфере мощной электромагнитной волной вблизи четвёртой гармоники гирочастоты с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о том, какие плазменные волны ответственны за возбуждение искусственного радиоизлучения.

Апробация результатов

Результаты работы были представлены на следующих конференциях:

XIII, XV, XVIII, XIX научные конференции по радиофизике 2009, 2011, 2014, 2015 годов, Нижний Новгород, ННГУ, радиофизический факультет.

14, 15, 19, 20 Нижегородские сессии молодых учёных 2009, 2010, 2014, 2015 годов, Нижегородская область.

38th COSPAR Scientific Assembly, 2010, Bremen, Germany

XXIII всероссийская научная конференция «распространение радиоволн», 2011 Йошкар-Ола.

Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2017, Saint Petersburg, Russia.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием 3.1252.2014/К.

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие в постановке задач. Им выполнены все аналитические и численные расчёты. Он также принимал участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём составляет 120 страниц. В диссертации 62 рисунка, 76 формул. Количество цитированных источников – 80, в том числе публикаций диссертанта – 15.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена её цель и решаемые задачи, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и кратко излагается содержание диссертации.

В **первой главе** выполнено обобщение известной леммы Лоренца для квазимонохроматических квазиплоских электромагнитных волновых полей на случай сред с произвольной пространственной дисперсией. Рассмотрено применение обобщённой леммы Лоренца для расчёта полей излучения заданных источников в однородных средах с пространственной дисперсией.

В **разделе 1.1** изложен вывод из уравнений Максвелла леммы Лоренца для квазимонохроматических квазиплоских электромагнитных волновых полей в среде с произвольной пространственной дисперсией. При решении задач в средах с пространственной дисперсией, лемма Лоренца, должна формулироваться по-другому. В этом случае реальное электромагнитное поле заданной частоты необходимо рассматривать как квазимонохроматическое, а нормальные волны в однородной среде как квазиплоские, подобно тому, как это делается при выводе обобщенной теоремы Пойнтинга в диспергирующих средах [11]. Тогда для квазимонохроматических квазиплоских волновых полей в однородной линейной среде с произвольной дисперсией лемма Лоренца должна формулироваться следующим образом:

$$\oint_S \left\{ [\mathbf{E}_1 \mathbf{B}_2] - [\mathbf{E}_2 \mathbf{B}_1] + \frac{\omega}{c} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial \mathbf{k}} E_{1j} E_{2i} \right\} \mathbf{n} dS = \frac{4\pi}{c} \int_V (\mathbf{j}_1^e \mathbf{E}_2 - \mathbf{j}_2^e \mathbf{E}_1 - \mathbf{j}_1^m \mathbf{B}_2 + \mathbf{j}_2^m \mathbf{B}_1) dV, \quad (1)$$

где S – поверхность, ограничивающая объем V , $\mathbf{n}$ – ее внешняя нормаль, $\mathbf{j}_1^e, \mathbf{j}_1^m, \mathbf{j}_2^e, \mathbf{j}_2^m$ – сторонние источники заданной частоты, создающие электрические и магнитные поля $\mathbf{E}_1, \mathbf{B}_1$ и $\mathbf{E}_2, \mathbf{B}_2$ в одной и той же стационарной среде соответственно. Отличие от традиционной формулировки состоит в наличии дополнительного слагаемого, содержащего производную от тензора диэлектрической проницаемости по волновому вектору.

В разделе 1.2 получено на основе обобщенной леммы Лоренца выражение для амплитуд квазиплоских составляющих поля излучения в волновой зоне заданного монохроматического источника в однородной среде с произвольной пространственной дисперсией. В работе [6] показано, как при помощи леммы Лоренца можно рассчитать поле излучения в волновой зоне заданного источника, находящегося в безграничной однородной среде. В результате, в формуле, полученной в [6], в выражении для нормы волны [6] появляется дополнительное слагаемое, обусловленное обобщенной формулировкой леммы Лоренца (1).

В разделе 1.3. на основе полученных выше общих выражений решена задача об излучении монохроматического точечного электрического диполя в плазме, помещённой в настолько сильное внешнее магнитное поле, что гирочастота электронов значительно превосходит частоту источника и плазменную частоту электронов, и среда представляет собой одноосный кристалл с $\varepsilon_{\perp} = 1$ (замагниченная плазма). Локальное поле излучения в волновой зоне представляется в виде суперпозиции квазиплоских волн, групповая скорость которых направлена от источника в точку наблюдения. Из общих выражений, полученных при помощи обобщённой леммы Лоренца, найдены амплитуды этих квазиплоских волн в случае, когда излучающий диполь ориентирован вдоль внешнего магнитного поля. В качестве примера рассмотрен частный случай излучения неподвижного диполя в холодной плазме, однородно движущейся вдоль внешнего магнитного поля. Показано, что в этом случае выражения для амплитуд квазиплоских волн в волновой зоне, найденные при помощи обобщённой леммы Лоренца, совпадают с полученными ранее другим способом. Причём совпадение имеет место только при учёте дополнительного слагаемого в математическом выражении леммы Лоренца, обусловленного пространственной дисперсией, возникающей за счёт движения даже холодной плазмы.

Вторая глава посвящена кинетическому расчёту влияния теплового движения электронов на характеристики излучения неподвижного монохроматического электрического диполя в движущейся вдоль оси Z с постоянной скоростью V_0 сильно замagnetической плазме.

Во введении к главе и разделе 2.1. уточняется постановка задачи и приводятся дисперсионные кривые, построенные в результате решения

дисперсионного уравнения для рассматриваемой среды в холодном приближении в случае, когда частота источника больше плазменной [3]. При расчёте волновых полей и закона дисперсии используется кинетическое описание среды в предположении, что невозмущённая функция распределения электронов по скоростям в системе отсчета, движущейся со средней скоростью V_0 , является максвелловской. Тогда в неподвижной системе отсчета в приближении замагниченной плазмы тензор диэлектрической проницаемости плазмы в соответствии с общими формулами преобразования полей и частоты волны имеет диагональный вид $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 1$, а $\varepsilon_{zz}(\omega, \mathbf{k})$ зависит от температуры [1]. Дисперсионное уравнение выглядит следующим образом:

$$k_\rho = \sqrt{\varepsilon_{zz} \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2 \right)} \quad (2)$$

где $k_\rho^2 = k_x^2 + k_y^2$. При этом отбираются ветви дисперсионных кривых, соответствующие волнам, бегущим от источника в точку наблюдения, групповая скорость которых направлена под выбранным углом наблюдения θ , т.е. удовлетворяющие условиям $\frac{\partial k_\rho}{\partial \omega} > 0$ и

$$\frac{\partial k_\rho}{\partial k_z} = -\text{ctg} \theta \quad (3).$$

Ветви дисперсионных кривых в приближении холодной плазмы показаны на левом рисунке 1 для следующих значений параметров плазмы: $\omega_p/\omega = 2/3$, $V_0/c = 0,1$.

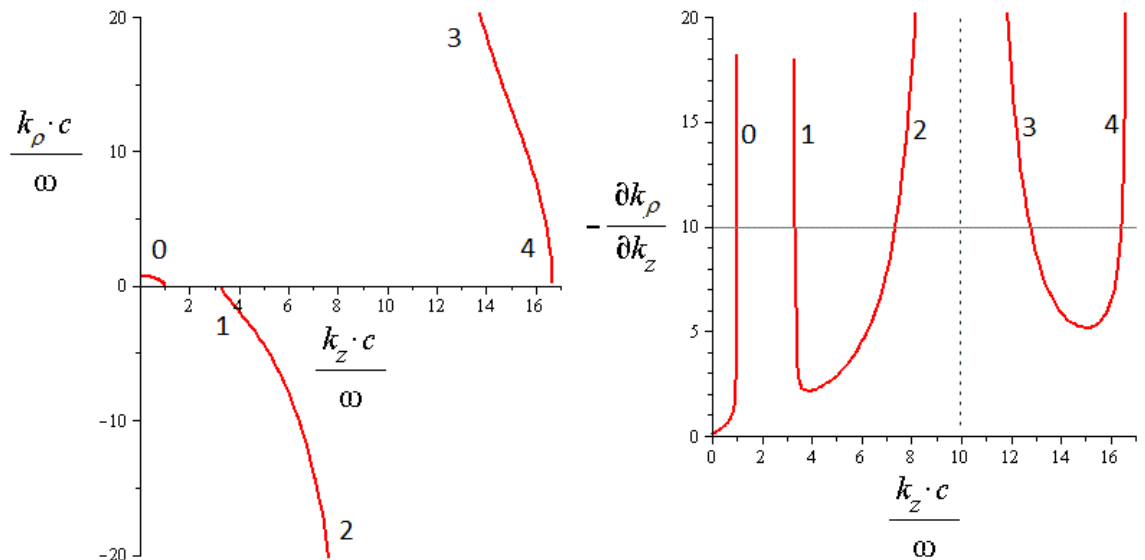


Рис. 1. Зависимости $k_\rho c / \omega$ от $k_z c / \omega$ (слева) и $-\frac{\partial k_\rho}{\partial k_z} \cdot \frac{k_z c}{\omega}$ (справа).

График зависимости $-\frac{\partial k_\rho}{\partial k_z}$ от $\frac{k_z c}{\omega}$ для аналогичных параметров в приближении холодной плазмы представлен справа на рисунке 1.

Анализ дисперсионных кривых показывает, что в волновой зоне излучение монохроматического источника с продольным током может быть представлено в виде суперпозиции нескольких квазиплоских волн. Они характеризуются общим направлением групповой скорости (направлением от источника к точке наблюдения) и разными волновыми векторами. Так для достаточно малых углов наблюдения θ (углов между групповой скоростью и магнитным полем) число таких волн равно пяти. При стремлении угла наблюдения к нулю одна из них соответствует поперечной волне в вакууме, две другие хорошо известны и представляют собой быструю и медленную продольные волны пространственного заряда. Продольная фазовая скорость двух оставшихся волн при уменьшении угла наблюдения приближается к средней скорости потока плазмы, и свойства этих квазисинхронных волн в приближении холодной плазмы полностью выяснить не удаётся.

В разделе 2.2. приведены результаты кинетического расчёта при учёте теплового движения электронов плазмы. Показано, что в случае, когда средняя скорость движения плазмы значительно превосходит тепловую скорость электронов, их тепловое движение оказывает наибольшее влияние на характеристики указанных выше квазисинхронных волн, которые излучаются под малыми углами θ . При этом выяснено, что в случае действительной частоты излучения источника продольная и поперечная составляющие волновых векторов этих волн становятся, при учёте теплового движения электронов плазмы, комплексными. Этот результат получен путём численного решения системы уравнений (2) и (3), описанным в этом разделе методом.

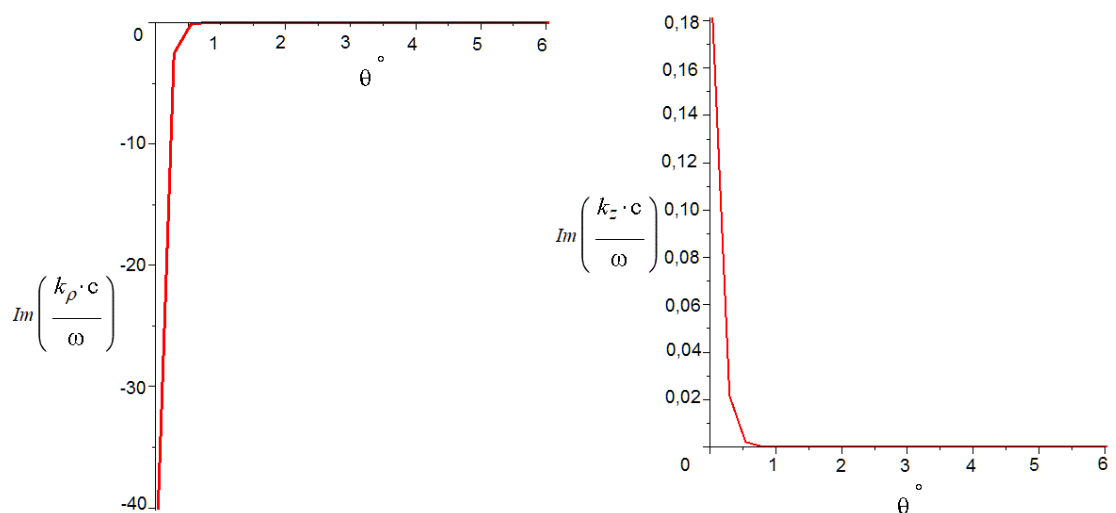


Рис. 2. Мнимые части $k_\rho c/\omega$ и $k_z c/\omega$ для волны 2.

Проведённый численный анализ позволяет выяснить, что квазисинхронные волны являются существенно неоднородными и претерпевают значительное бесстолкновительное затухание.

Далее на основе полученных в первой главе общих выражений и рассчитанных здесь значений волновых векторов проводится численный анализ зависимости амплитуд полей различных излучаемых волн от угла наблюдения.

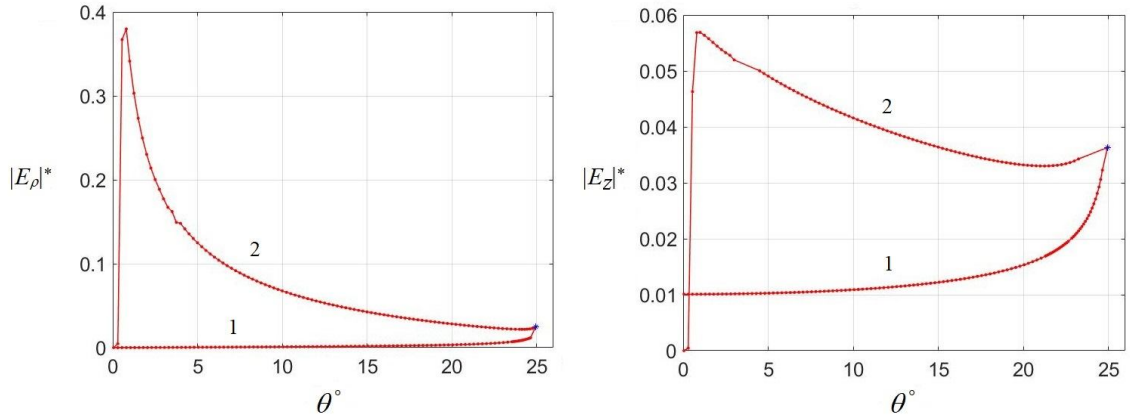


Рис. 3. Зависимости $|E_\rho|^* \sim E_\rho$ и $|E_z|^* \sim E_z$ от угла θ для волн с $\text{Re } k_z < \omega/V_0$.

Полученные результаты показывают, что при приближении угла θ к нулю, там, где наблюдается значительное увеличение мнимых частей волновых векторов квазисинхронных волн, амплитуды их полей резко спадает до нуля вследствие бесстолкновительного затухания Ландау.

В разделе 2.3. приведены результаты кинетического расчёта излучения диполя в движущейся замагниченной плазме на частоте меньше плазменной. В этом случае дисперсионные кривые излучаемых волн заметно отличаются от предыдущего. Тем не менее, в поле излучения в волновой зоне по-прежнему присутствуют квазисинхронные волны, продольная фазовая скорость которых при уменьшении угла наблюдения приближается к средней скорости потока плазмы. Проведённый численный расчёт показывает, что при приближении угла наблюдения θ к нулю в этом случае также происходит резкое увеличение мнимой части волновых векторов этих волн и стремление амплитуд их поля к нулю вследствие бесстолкновительного затухания.

В разделе 2.4. при численном расчёте дисперсионных кривых и амплитуд волн учитывается влияние соударений электронов плазмы с нейтральными частицами. В результате выяснено, что зависимость амплитуд компонент электрического поля от угла наблюдения при относительно малом числе соударений качественно не меняется.

В заключении главы отмечено на основе численного расчёта, что, хотя квазисинхронные волны при малых углах наблюдения являются сильно неоднородными, их амплитуда всегда уменьшается при удалении от источника в направлении групповой скорости.

В **третьей главе** рассматривается излучение в движущейся сильно замагниченной плазме антенны бегущей волны, пространственный спектр тока в которой может иметь узкий максимум, соответствующий продольной фазовой скорости одной из возможных излучаемых волн.

В **разделе 3.1.** приведено выражение для плотности стороннего тока в антенне конечной длины.

В **разделе 3.2.** получено выражение для амплитуд полей, излучаемых антенной бегущей волны, в дальней зоне. Аналогичным, использованному в предыдущей главе, численным методом рассчитана зависимость от угла наблюдения амплитуд продольной и поперечной составляющих полей излучения квазисинхронных волн. Некоторые результаты численных расчётов показаны для второй волны на следующих рисунках, где h – постоянная распространения тока вдоль антенны

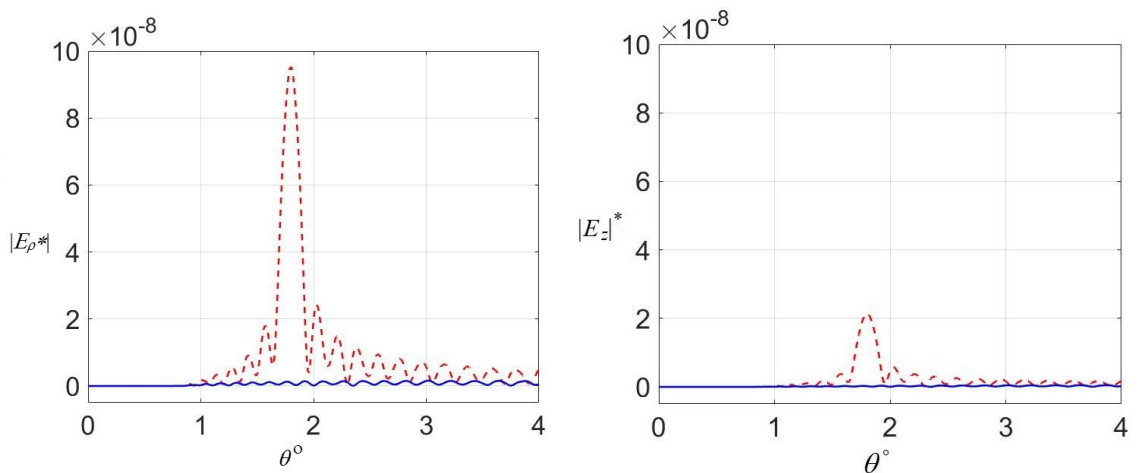


Рис. 4. Зависимости $E_\rho^* \sim |E_\rho|$ и $E_z^* \sim |E_z|$, нормированные одинаковым образом, от угла θ для волны 2. Сплошная линия соответствует значению $h = 9,99 \omega/c$, штриховая – $h = 8,5 \omega/c$.

Выяснено, что в случае достаточно длинной антенны зависимость амплитуд быстрой и медленной квазисинхронных волн от угла наблюдения имеет резкий максимум при небольших углах, если фазовая скорость тока в антенне не слишком близка к скорости движения плазмы. При приближении фазовой скорости тока в антенне к скорости движения плазмы (стремлении угла наблюдения к нулю) амплитуды полей излучения квазисинхронных волн стремятся к нулю. Для сравнения аналогичный расчёт выполнен в случае, когда фазовая скорость тока в антенне равна фазовой скорости быстрой волны пространственного заряда. При этом амплитуда продольной составляющей поля излучения имеет максимум при нулевом угле наблюдения. Отличие от квазисинхронных волн обусловлено тем, что в

последнем случае фазовая скорость волны далека от средней скорости движения плазмы, и бесстолкновительное затухание сильно ослаблено.

Раздел 3.3. посвящён расчету и анализу сопротивления излучения антенны бегущей волны в движущейся замагниченной плазме. В случае тонкой антенны, длина которой l значительно превосходит длину волны заданного распределения тока, получено выражение, позволяющее найти значения сопротивлений излучения отдельных квазиплоских волн с различными продольными фазовыми скоростями. Сопротивление излучения записывается следующим образом:

$$R = \frac{2l}{(2\pi)^5} \frac{1}{\omega} \frac{1}{2} \left(h^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \text{Im} \left\{ \ln \left[\varepsilon_{zz}(\omega, h) \left(h^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Эта формула позволяет найти, как меняется сопротивление излучения в зависимости от постоянной распространения бегущей волны тока в антенне.

Выяснено, что модуль сопротивления излучения квазисинхронных волн остаётся конечным при тех малых углах наблюдения, при которых их амплитуда в волновой зоне практически равна нулю. Это означает, что мощность, развиваемая антенной бегущей волны вблизи синхронизма, почти полностью уходит на изменение средней, за период колебаний, кинетической энергии электронов плазмы, движущихся вдоль Z со скоростями, близкими к фазовой скорости излучаемых волн. Это происходит за счёт бесстолкновительного взаимодействия Ландау. Для медленной квазисинхронной волны и медленной волны пространственного заряда сопротивление излучения отрицательно. Это согласуется с тем, что вектор плотности потока их энергии в волновой зоне направлен против групповой скорости к источнику, и означает, что если в антенне могут существовать собственные волны тока (имеет место замедляющая система) с соответствующими значениями постоянной распространения, то они могут быть неустойчивыми.

В разделе 3.4. аналогичным предыдущему методом рассматривается излучение в движущейся сильно замагниченной плазме тонкой достаточно длинной антенны бегущей волны на частоте меньше плазменной. В результате численного расчёта показано, что зависимость амплитуд и сопротивления излучения квазисинхронных волн и быстрой волны пространственного заряда от угла наблюдения качественно соответствует рассмотренному выше случаю излучения на частоте больше плазменной.

В четвёртой главе рассматривается влияние бесстолкновительного циклотронного поглощения на характеристики квазипотенциальных плазменных волн, генерируемых в области верхнегибридного резонанса при воздействии на ионосферу Земли мощной электромагнитной волны накачки.

В разделе 4.1. приведены экспериментальные данные, полученные на стенде «Сура», о релаксации (после выключения волны накачки) искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) для частот воздействующей волны в области четвёртой электронной giroгармоники, которые показывают существенное уменьшение времени релаксации при частоте волны накачки в непосредственной близости от giroгармоники [10].

В разделе 4.2. выполнен расчёт декрементов затухания плазменных волн в плазме с параметрами, близкими к параметрам ионосферы при проведении экспериментов для частот плазменных волн в окрестности 4-ой гармоники электронной циклотронной частоты при различных значениях верхнегибридной частоты ω_{uh} . Различные значения ω_{uh} соответствуют различным значениям плазменной частоты, и, следовательно, различным значениям электронной концентрации и различным высотам в ионосфере. Расчёты декрементов затухания выполнялись путём численного решения дисперсионного уравнения для плазменных волн в потенциальном приближении в случае максвелловского распределения частиц по скоростям.

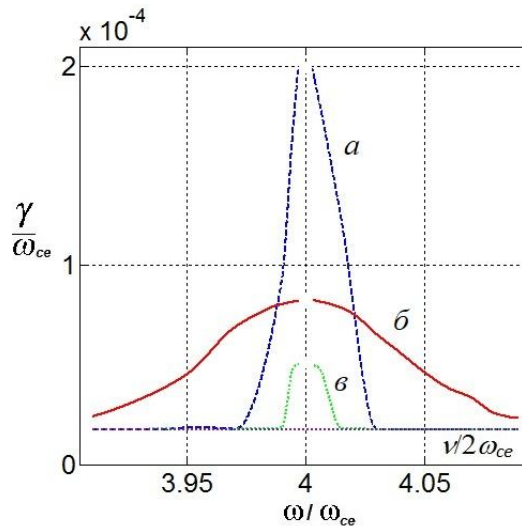


Рис. 6. Зависимость декрементов затухания от частоты для различных верхнегибридных частот. Значения ω , γ , ω_{uh} нормированы на ω_{ce} . На рисунке отображены следующие кривые: а) $\omega = 1,002\omega_{uh}$, высота ниже высоты верхнегибридного резонанса, где $\omega = \omega_{uh}$; б) $\omega = \omega_{uh}$; в) $\omega = 0,998\omega_{uh}$, высота выше высоты верхнегибридного резонанса. На рисунке отображен случай отношения $k_{\perp}\rho_e = 0,14$

В результате вычислений выяснено, что характерный максимум декрементов затухания на четвёртой гармонике giroчастоты наиболее ярко выражен в коротковолновой области для частот, несколько превышающих верхнегибридную. Такая зависимость имеет место только для верхнегибридной ветви плазменных волн. Для ленгмюровских волн максимум декремента при приближении частоты волны к giroгармонике не наблюдается.

В разделе 4.3. при помощи численного расчёта показано, что кинетический учёт теплового движения электронов на основе использования модельного интеграла столкновений электронов плазмы с нейтральными частицами Батнагара—Гросса—Крука приводят к аддитивной добавке к затуханию плазменных волн, величина которой существенно меньше бесстолкновительного затухания в резонансной области при частоте волны, близкой к четвёртой гармонике гирочастоты электронов.

В разделе 4.4. проводится сравнение приведённых в этой главе экспериментальных данных, полученных на стенде «Сура», о релаксации (после выключения волны накачки) искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) с результатами выполненного численно кинетического анализа декрементов затухания плазменных волн, генерируемых при воздействии на ионосферу мощного радиоизлучения. Поскольку генерация ИРИ происходит при рассеянии плазменных волн на магнитоориентированных мелкомасштабных неоднородностях ионосферы в электромагнитные без изменения частоты, временные характеристики ИРИ должны соответствовать временным характеристикам генерируемых плазменных волн. Поэтому обнаруженное совпадение результатов выполненного расчёта частотной зависимости декрементов затухания верхнегибридных плазменных волн с измеренной зависимостью времени затухания наблюдаемого искусственного радиоизлучения от частоты позволяет сделать вывод о том, что важный вклад в генерацию искусственного радиоизлучения дают плазменные волны, распространяющиеся под углами $60-70^\circ$ к магнитному полю Земли.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выполнено обобщение леммы Лоренца для квазимонохроматических квазиплоских полей на случай сред с произвольной пространственной дисперсией. Справедливость полученной обобщённой формулировки леммы Лоренца подтверждена совпадением результатов расчёта поля излучения электрического диполя в холодной движущейся сильно замагниченной плазме с её помощью и другим способом.

2. Выяснено, что только кинетический подход, учитывающий тепловое движение электронов позволяет корректно рассчитать для волновой зоны источника сложную локальную многоволновую структуру поля излучения монохроматического электрического диполя в однородно движущейся с постоянной средней скоростью сильно замагниченной плазме. Кинетический расчёт показывает, что квазисинхронные волны, продольная фазовая скорость которых при малом угле между внешним магнитным полем и направлением из точки наблюдения на источник близка к средней скорости потока, сильно затухают вдоль направления групповой скорости из-за

бесстолковительного поглощения при резонансном взаимодействии с электронами движущейся плазмы.

3. Кинетический расчёт сопротивления излучения антенны бегущей волны в движущейся замагниченной плазме показывает, что оно остаётся конечным при тех значениях постоянной распространения тока в антенне, при которых под малыми углами к магнитному полю излучаются сильно затухающие квазисинхронные волны. Это означает, что в этом случае основная часть развиваемой антенной мощности тратится в итоге на изменение средней за период кинетической энергии электронов плазмы в результате бесстолкновительного взаимодействия Ландау.

4. Выполненный кинетический расчёт зависимости от частоты декремента затухания верхнегибридных плазменных волн, возбуждаемых в ионосфере мощной электромагнитной волной, позволяет путём сравнения с экспериментальной частотной зависимостью времени затухания искусственного радиоизлучения сделать вывод о том, что важный вклад в генерацию искусственного радиоизлучения дают плазменные волны, распространяющиеся под углами $60-70^\circ$ к магнитному полю Земли.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А.Ф. Основы электродинамики плазмы / А.Ф. Александров, Л.С. Богданкевич, А.А. Рухадзе; под редакцией А.А. Рухадзе – М.: Высшая школа, 1978. – 407 с.
2. McKenzie, J.F. Effect of the Motion of a Strongly Magnetized Plasma on the Emission of Radiation by a Finite Dipole / J.F. McKenzie // Journal of Applied Physics. – 1967. – Vol. 38. – P. 5249.
3. Гавриленко, В.Г. К вопросу об установлении поля излучения источника в движущейся замагниченной плазме / В.Г. Гавриленко, С.И. Зайцев // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1984. – Т.27. – №7. – С. 892.
4. Гавриленко, В.Г. О резонансном взаимодействии электромагнитных волн с неоднородным потоком магнитоактивной плазмы / В.Г. Гавриленко, Л.А. Зелексон // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1977 – Т.20. – № 7. – С. 982.
5. Гавриленко, В.Г. К кинетической теории поглощения электромагнитных волн неоднородным потоком замагниченной плазмы / В.Г. Гавриленко, Л.А. Зелексон // Физика плазмы. – 1980 – Т.6. – № 5. – С. 1046.
6. Кондратьев, И.Г. Применение леммы Лоренца к расчету полей излучения заданных источников в безграничных средах / И.Г. Кондратьев, В.И. Таланов // ЖТФ. – 1965. – Т. 35. – № 3. – С.571.
7. Физическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2. С. 608.
8. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
9. Железняков, В.В. Излучение в астрофизической плазме / В.В. Железняков – М.: Янус-К, 1997. – 528 с.
10. Сергеев, Е.Н. Диагностика возмущённой области ионосферы с помощью широкополосного радиоизлучения / Е.Н. Сергеев, С.М. Грач, П.В. Котов, Г.П. Комраков, Г.Н. Бойко, Ю.В. Токарев // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50. – № 8. – С. 649.
11. Агранович, В.М. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов / В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург – М.: Наука, 1965. – 376 с.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, а также в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Бареев, Д.Д. О лемме Лоренца для сред с пространственной дисперсией и её применении к расчёту полей излучения заданных источников / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2009. – Т.52. – №10. – С. 817.
2. Бареев, Д.Д. К кинетической теории излучения точечного монохроматического дипольного источника в движущейся замагниченной плазме / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко, В.Д. Пикулин // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2013. – Т.56. – №5. – С. 322.
3. Bareev, D.D. Estimation of HF artificial ionospheric turbulence characteristics using comparison of calculated plasma wave decay rates with the measured decay rates of the Stimulated Electromagnetic Emission / D.D. Bareev, V.G. Gavrilenko, S.M. Grach, E.N. Sergeev // Advances in Space Research. – 2016. – Vol. 57. – № 3. – P. 802.
4. Бареев, Д.Д. О влиянии движения сильно замагниченной плазмы на излучение антенны бегущей волны / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко, В.Д. Пикулин // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60. – №8. – С. 732.
5. Бареев, Д.Д. Определение характеристик плазменных волн, ответственных за генерацию искусственного радиоизлучения ионосферы, путем сравнения рассчитанных и измеренных декрементов затухания / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко, С.М. Грач, Е.Н. Сергеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – Т. 5. – №3. – С. 167.

Научные работы, опубликованные в трудах конференций

6. Bareev, D.D. On the impact of motion of strongly magnetized plasma to the radiation of traveling-wave antenna at frequency lower than plasma frequency / D.D. Bareev, V.G. Gavrilenko, V.D. Pikulin // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). – 2017 – P. 2399.
7. Grach, S.M. Determination of HF artificial ionospheric turbulence characteristics using comparison of calculated plasma wave decay rates with the measured see decay rates / S.M. Grach, D.D. Bareev, V.G. Gavrilenko, E.N. Sergeev // 38th COSPAR Scientific Assembly. – 2010. – abstract CD-ROM.
8. Бареев, Д.Д. Определение характеристик высокочастотной искусственной ионосферной турбулентности путем сравнения рассчитанных и измеренных декрементов затухания плазменных волн / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко, С.М. Грач, Е.Н. Сергеев // Сборник докладов XXIII

всероссийской научной конференции «распространение радиоволн». – 2011. – Т. 2. – С. 189.

9. Бареев, Д.Д. Применение леммы Лоренца для расчета полей излучения в средах с пространственной дисперсией / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко // Труды тринадцатой научной конференции по радиофизике. – 2009. – С. 49.

10. Бареев, Д.Д. Определение характеристик высокочастотной искусственной ионосферной турбулентности путем сравнения рассчитанных и измеренных декрементов затухания плазменных волн / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко, С.М. Грач, Е.Н. Сергеев // Тезисы докладов 15 нижегородской сессии молодых учёных. – 2010.

11. Бареев, Д.Д. Кинетический расчёт излучения диполя в движущейся замагниченной плазме / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко // Труды пятнадцатой научной конференции по радиофизике. – 2011. – С. 45.

12. Бареев, Д.Д. Кинетический расчёт излучения квазисинхронных волн точечного монохроматического дипольного источника в движущейся замагниченной плазме / Д.Д. Бареев // Доклады 15 нижегородской сессии молодых учёных. – 2014.

13. Бареев, Д.Д. К кинетической теории излучения источника в движущейся замагниченной плазме на частоте, меньше плазменной / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко, В.Д. Пикулин // Труды восемнадцатой научной конференции по радиофизике. – 2014. – С. 60.

14. Бареев, Д.Д. О влиянии соударений и черенковского резонанса на излучение диполя в движущейся замагниченной плазме / Д.Д. Бареев // Доклады 16 нижегородской сессии молодых учёных. – 2015.

15. Бареев, Д.Д. О влиянии столкновительного и бесстолкновительного затухания на излучение диполя в движущейся замагниченной плазме / Д.Д. Бареев, В.Г. Гавриленко, В.Д. Пикулин // Труды девятнадцатой научной конференции по радиофизике. – 2015. – С. 59.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ЛЕММА ЛОРЕНЦА ДЛЯ СРЕД С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ.....	19
1.1. Обобщение леммы Лоренца на случай сред с пространственной дисперсией.....	20
1.2. Применение леммы Лоренца к расчету полей излучения заданных источников в безграничных средах.....	26
1.3. Поле излучения точечного электрического диполя в сильно замагниченной плазме.....	28
2. КИНЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИПОЛЯ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ.....	38
2.1. Постановка задачи.....	39
2.2. Кинетический расчет дисперсионных кривых и амплитуд полей.....	43
2.3. Результаты расчета дисперсионных кривых и амплитуд полей для частот меньше плазменной.....	57
2.4. Расчёт влияния соударений электронов на излучения диполя в движущейся замагниченной плазме.....	64
3. О ВЛИЯНИИ ДВИЖЕНИЯ СИЛЬНО ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ НА ИЗЛУЧЕНИЕ АНТЕННЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ.....	74
3.1. Постановка задачи.....	75
3.2. Амплитуды полей в волновой зоне.....	75
3.3. Сопротивление излучения антенны.....	80
3.4. Расчет амплитуд полей и сопротивления излучения для частоты излучения меньше плазменной.....	86
4. КИНЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ДЕКРЕМЕНТОВ ЗАТУХАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРУ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ.....	93
4.1. Экспериментальные данные по релаксации ИРИ вблизи четвёртой гармоники гирочастоты.....	94
4.2. Расчет бесстолкновительных декрементов затухания плазменных волн.....	97
4.3. О влиянии соударений электронов на декременты затухания плазменных волн.....	108
4.4. Обсуждение результатов.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
ЛИТЕРАТУРА.....	112