



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИФЗ РАН
Д.ф.-м.н.

Тихоцкий С.А.

«18» апреля 2016 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук
на диссертационную работу Широкова Евгения Алексеевича
**«Возбуждение пространственно-временного пакета резонансных
квазиэлектростатических волн антеннами в магнитоактивной плазме»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – «физика плазмы»

Развитие теории антенн в магнитоактивной плазме имеет большое значение для изучения космической плазмы. Развитию этой теории для случая возбуждения пространственно-временного пакета резонансных квазиэлектростатических волн посвящена диссертационная работа Широкова Е. А. Эта тема, несомненно, актуальна. Целями работы являлись: детальный теоретический анализ распространения импульсного сигнала в однородной и неоднородной плазме в линейном режиме, построение самосогласованной модели стадии формирования (роста) плазменно-волнового канала в условиях ионизационной нелинейности, разработка теоретических основ численного метода моментов для расчета квазистатических антенн в плазме.

Автором получен целый ряд новых и значимых результатов:

1) Исследовано распространение медленных квазиэлектростатических волн, возбуждаемых в магнитоактивной плазме в резонансной полосе частот гармоническим источником в импульсном режиме. Найдены эффекты группового запаздывания и аномального расплывания сигнала в случае его распространения в однородной и кусочно-однородной плазме.

2) Детально объяснены результаты двухточечного (излучатель–приемник) ионосферного эксперимента OEDIPUS-C на высотах 600–800 км, в котором уже на расстояниях порядка десяти длин волн (частота 100 кГц, длина волны 124 м) наблюдалось заметное запаздывание сигнала, приблизительно равное $(1\div 3) \cdot 10^{-4}$ с, и значительное (в несколько раз) расплывание импульса с начальной длительностью 0,3 мс.

3) Аналитически найден класс пространственно-временных распределений резонансного поля излучения в линейном режиме, которые зависят от «автомодельной» переменной, включающей в себя и время, и пространственные координаты.

4) Изучено ионизационное самоканалирование квазипотенциальных волн в нижнегибридном диапазоне частот, приводящее к образованию плазменно-волнового канала. По заданным характеристикам излучателя и фоновой плазмы определены основные параметры плазмы канала: например, в характерных условиях ночной ионосферы на высоте 150 км квазистатическая дипольная антенна с размером 25,6 м, частотой излучения $4,3 \cdot 10^6$ с⁻¹ и мощностью сигнала 0,07 кВт возбуждает канал со средней температурой электронов 1,49 эВ, концентрацией $1,0 \cdot 10^4$ см⁻³ и длиной разрядной части 9,31 км.

5) Аналитически найдены нестационарные самосогласованные распределения концентрации плазмы и величины электрического поля в малой области за фронтом ионизации.

ции. Показано, что величина электрического поля на самом фронте ионизации в рамках использованной модели на порядок величины превосходит пробойное значение.

б) Показано, что численный метод моментов может быть использован для расчета распределений заряда по поверхности антенн в магнитоактивной плазме в квазистатическом приближении, в том числе в резонансных условиях, когда функция Грина уравнения для потенциала комплексная и имеет особенность на характеристиках этого уравнения. Проведенные тестовые расчеты показали сравнительно высокую точность метода: например, относительная ошибка вычисления входного импеданса таким методом не превышает 1 % при числе сегментов, на которые условно разделяется антенный провод, порядка 10. Показано, что в отличие от вакуума, в магнитоактивной плазме даже для тонкого провода во многих случаях в расчетах важно учитывать зависимость поверхностного заряда от азимутального угла.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы (работы автора приведены отдельным списком). Общий объем диссертации составляет 102 страницы, включая 27 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 106 наименований, из них 18 – работы автора по теме диссертации.

В главе 1 рассматриваются различные аспекты возбуждения, распространения и приема пакета резонансных квазиэлектростатических волн в магнитоактивной плазме в линейном случае.

Раздел 1.1 посвящен развитию теоретических основ численного метода моментов на случай квазистатических антенн, находящихся в анизотропной плазме. Теоретическое рассмотрение строится на анализе функции Грина уравнения для потенциала поля излучения антенны. Эта функция в резонансных условиях имеет особенности на характеристиках гиперболического уравнения для потенциала. Показывается, что несмотря на эту особенность функции Грина, которая является ядром интегрального оператора в соответствующем уравнении, метод моментов позволяет получить достаточно точные распределения заряда по поверхности антенны. Вычисляется погрешность определения (на основе рассчитанного распределения заряда) входного импеданса тонкой квазистатической антенны относительно теоретического значения. Показывается, что эта погрешность достаточно мала (порядка 1 %), если число сегментов составляет порядка 10. Также большое внимание уделяется приближению «тонкой» антенны, которое в анизотропной среде отличается от вакуумного случая и значительно влияет на выбор способа сегментации.

В разделе 1.2 в квазистатическом приближении излагается линейная теория возбуждения нестационарного резонансного поля в магнитоактивной плазме. Рассмотрение ведется для случая распространения прямоугольного импульса. С одной стороны, этот случай сравнительно прост для анализа, а с другой – позволяет выявить характерные особенности в пространственно-временной структуре поля излучения. Рассчитываются соответствующие квазистатические потенциал, электрическое и магнитное поля излучения.

В разделе 1.3 построенная линейная теория применяется для нахождения нестационарного поля излучения тонких электрических диполей с разрывным (кусочно-постоянным в силу анализа, проведенного в разделе 1.1) и гладким распределениями заряда вдоль антенного провода. Показывается, что при распространении в магнитоактивной плазме прямоугольный импульс значительно искажается: он испытывает сильное групповое запаздывание (задержку) и значительное аномальное (с учетом только линейного члена в разложении дисперсионного соотношения по частоте, т. е. без учета «классической», квадратичной по частоте, дисперсии) расплывание. Результаты теоретического рассмотрения сравниваются с результатами ионосферного эксперимента OEDIPUS-C по возбуждению, распространению и приему резонансных волн с помощью антенн, установленных на двух ракетах (излучатель–приемник), в котором уже на расстояниях порядка десяти длин волн (частота 100 кГц, длина волны 124 м) наблюдалось заметное запаздывание сигнала, приблизительно равное $(1 \div 3) \cdot 10^{-4}$ с, и значительное (в несколько раз) рас-

плывание импульса с начальной длительностью 0,3 мс. Показывается, что построенная теория с учетом резонансного отклика приемной антенны объясняет результаты этого эксперимента в деталях. Также аналитически найден класс пространственно-временных распределений резонансного поля излучения в линейном режиме, которые зависят от «автомодельной» переменной, включающей в себя и время, и пространственные координаты.

В разделе 1.4 в квазистатическом приближении излагается линейная теория возбуждения нестационарного резонансного поля в бесконечно длинном цилиндрическом плазменном волноводе, ориентированном вдоль внешнего магнитного поля. При этом полагается, что в волноводе выполнены условия резонанса (т. е. возбуждения квазиэлектростатических волн), а в фоновой плазме – нет. Выводится и анализируется дисперсионное соотношение, определяются собственные моды, решается задача о возбуждении такого волновода сторонним дипольным источником в виде двух колец, а также рассматривается распространение прямоугольного импульса вдоль волновода. С одной стороны, решение такой задачи позволяет естественным образом обобщить результаты разделов 1.2 и 1.3 на случай неоднородной среды, а с другой – является основой для постановки и решения нелинейной задачи о самоканалировании волн в плазме, которая анализируется далее.

В главе 2 анализируется задача об ионизационном самоканалировании квазиэлектростатических волн в плазме, приводящем к формированию вытянутых вдоль магнитного поля плазменных дактов.

В разделе 2.1 приводятся самосогласованные уравнения для распределения электрического поля излучения, концентрации и температуры электронов в условиях, когда баланс концентрации обусловлен диффузией заряженных частиц, ионизацией электронным ударом, диссоциативным прилипанием электронов, электронной рекомбинацией и источником, поддерживающим равновесную концентрацию фоновой плазмы. Отмечаются условия, при которых уравнение для концентрации имеет сравнительно простой вид уравнения диффузии.

В разделе 2.2 делаются оценки параметров канала (концентрации и температуры электронов, длины в стационарном режиме) по заданным параметрам фоновой плазмы (на примере характерных условий ночной ионосферы на высоте 150 км) и характеристикам излучающей квазиэлектростатические волны антенны. Предлагается упрощенная модель динамики (формирования) плазменно-волнового канала, в рамках которой предполагается, что единственная существенно нестационарная область – это сравнительно малая окрестность фронта ионизации. На основе этой модели аналитически рассчитываются самосогласованные автомодельные распределения поля излучения и концентрации электронов вблизи фронта ионизации. При этом температура электронов полагается однородной и постоянной в канале, а для зависимости частоты ионизации от амплитуды электрического поля используется распространенная степенная аппроксимация. Показывается, что в силу своеобразной пространственной конфигурации характеристик гиперболического уравнения для потенциала вблизи фронта ионизации реализуется квазиодномерный режим. При этом электрическое поле вблизи фронта ионизации резко возрастает и более чем на порядок величины превосходит пробойное значение.

В заключении сформулированы основные результаты.

Недостатком работы является несколько неудачное соотношение объёмов глав 1 и 2: первая глава значительно длиннее второй. Вероятно, следовало бы разделить текст на главы как-либо иначе. Этот недостаток, разумеется, незначителен, а результаты диссертационной работы представляют несомненную ценность. Они могут быть использованы для развития новых радиофизических методов диагностики космической плазмы.

По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, 4 статьи в сборниках трудов конференций и 8 тезисов докладов на конференциях.

Результаты диссертационной работы Широкова Е. А. могут использоваться в научных организациях, занимающихся теоретическими и экспериментальными исследованиями в области физики плазмы (ННГУ, МГУ, ИЗМИРАН, ИСЗФ СО РАН, ФИАН и др.).

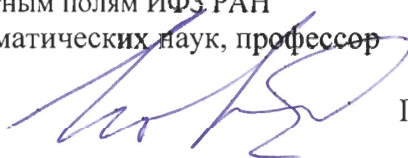
Диссертация Широкова Е. А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные задачи теории антенн в плазме. Задачи и содержание работы отвечают паспорту специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа Широкова Евгения Алексеевича отвечает критериям пункта 9 «Положения о порядке присвоения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы».

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Отзыв заслушан на совместном заседании лабораторий физики околоземного пространства (402) и геоэлектродинамики (403) ИФЗ РАН (Протокол заседания от 15 апреля 2016 г.), а также рассмотрен научным семинаром по геоэлектродинамике и волновым геомагнитным полям ИФЗ РАН 15 апреля 2016 г., на котором был заслушан доклад Широкова Е.А. и обсуждена представленная диссертация (протокол от 15 апреля 2016 г.). Отзыв одобрен в качестве отзыва ведущей организации.

Заведующий лабораторией геоэлектродинамики (403)
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Российской академии наук,
Руководитель семинара по геоэлектродинамике
и волновым геомагнитным полям ИФЗ РАН
доктор физико-математических наук, профессор



Похотелов Олег Александрович

e-mail: pokh@ifz.ru
телефон: (499) 254-8805

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, тел. (499) 766-26-26, e-mail: direction@ifz.ru

Подпись зав.лабораторией 403 ИФЗ РАН, д.ф.-м.н., проф. О.А. Похотелова заверяю.

Ученый секретарь ИФЗ РАН
к.ф.-м.н.



В.В. Погорелов