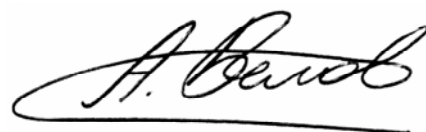


На правах рукописи



БЕЛОВ Алексей Сергеевич

**ИСКУССТВЕННЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ КАНАЛЫ
В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ:
ЛАБОРАТОРНЫЕ И НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

01.04.03 – радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Г.А. Марков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор С.В. Голубев

доктор физико-математических наук,
доцент Е.Н. Мясников

Ведущая организация: Институт космических
исследований РАН

Защита состоится «30» июня 2009 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «28» мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Интерес к исследованиям нелинейного взаимодействия сильного электромагнитного поля с неоднородной плазмой возник сравнительно давно [1*, 2*] и обусловлен с одной стороны задачами построения полной физической картины электромагнитных явлений в плазме, а с другой стороны необходимостью решения ряда прикладных задач радиофизики и физики плазмы и стимулируется, в первую очередь, потребностями и перспективами разнообразных приложений, включающих, в частности, активную волновую диагностику и мониторинг околоземного пространства, разработку новых каналов дальней радиосвязи, высокочастотный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза и т.д.

В магнитоактивной плазме нелинейные явления, возникающие при взаимодействии мощного радиоизлучения с плазмой, при определенных условиях могут привести к образованию ориентированных вдоль внешнего магнитного поля крупномасштабных плазменных неоднородностей с повышенной или пониженной плотностью плазмы [3*, 4*] – так называемых дактов плотности (от *duct* – канал), играющих роль волноводов для распространения радиоволн.

В последние годы при разработке программ активного воздействия на процессы генерации естественных магнитосферных излучений [5*] и экспериментов по контролируемым высыпаниям энергичных частиц [6*] все возрастающее внимание уделяется определению возможностей и условий формирования на высотах внешней ионосферы и в магнитосфере Земли искусственных волноводных каналов (дактов плотности), позволяющих влиять на ионосферно-магнитосферные связи, и изучению волновых явлений, наблюдаемых в таких структурах.

Натурные исследования по созданию искусственных плазменно-волновых каналов проводятся методами, основанными на активном воздействии на параметры ионосферной и магнитосферной плазмы мощным электромагнитным излучением как с поверхности Земли, так и с борта спутников и ракет.

Наиболее доступной методикой формирования искусственных дактов плотности, позволяющей многократно повторять создание плазменных возмущений с контролируемыми параметрами, является нагрев ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми наземным передатчиком. Очевидно, что подобного рода исследования удобнее проводить в спокойных геомагнитных условиях в среднеширотной ионосфере, чем в высокоширотной ионосфере с обычно достаточно высоким и быстро изменяющимся уровнем возмущенности. При этом одним из наиболее достоверных методов определения характеристик таких плазменных возмущений являются

непосредственные измерения с помощью бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли.

Техническая сложность и высокая стоимость программ космических исследований оправдывают изучение плазменных процессов в модельных экспериментах, проводимых в лаборатории. Обширный арсенал разработанных диагностических средств, позволяющих практически полностью контролировать условия эксперимента, делает лабораторное моделирование важной частью работ по изучению физических процессов в космической плазме, тем более что основные процессы, протекающие как в околоземной, так и в лабораторной плазме, подчиняются одним и тем же закономерностям.

Таким образом, суммируя все вышесказанное, можно заключить, что актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью изучения влияния искусственных волноводных каналов на локальные ионосферно-магнитосферные связи и развитие неустойчивостей в магнитоактивной плазме, а также разработки методов активной волновой диагностики околоземного пространства.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является проведение экспериментальных исследований плазменно-волновых каналов, формируемых мощным радиоизлучением в лабораторной и околоземной плазме, и изучение волновых явлений, наблюдаемых в таких структурах.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. лабораторные исследования нелинейных явлений в магнитоактивной плазме при наличии искусственной неоднородности в виде вытянутого вдоль внешнего магнитного поля плазменно-волнового канала;
2. определение возможностей и условий формирования искусственных волноводных каналов, влияющих на локальные ионосферно-магнитосферные связи, при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением наземных передатчиков;
3. натурные исследования влияния на процессы возбуждения и распространения низкочастотных электромагнитных волн искусственных плазменных каналов, вытянутых из ионосферы в магнитосферу Земли и создаваемых в результате взаимодействия радиоизлучения нагревного стенда «Сура» с плазмой F_2 -области.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется полученными оригинальными результатами и заключается в следующем:

1. В лабораторных экспериментах, качественно моделирующих условия активных экспериментов по созданию искусственных периодических неоднородностей в нижней ионосфере Земли, проведены исследования

вынужденного рассеяния волнового пучка, формирующего протяженный разрядный канал в пробочной магнитной ловушке, на релаксационных колебаниях решетки плазменных неоднородностей, создаваемой полем пучка.

2. Для условий плазменно-волнового разряда, соответствующих по параметрам подобия условиям во внешней ионосфере Земли, экспериментально исследована генерация ионно-звуковых волн, возбуждаемых в результате распада высокочастотной волны, формирующей разрядный канал.
3. В линейной пробочной конфигурации магнитного поля для ВЧ разряда, в котором распределение плотности плазмы и поперечного масштаба волнового канала качественно подобно распределению этих параметров в магнитосферном резонаторе с дактом повышенной плотности плазмы, обнаружена и исследована генерация электромагнитных излучений на частотах баунс колебаний потоков быстрых электронов плазмы разряда.
4. Путем непосредственных (*in situ*) измерений с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ «DEMETER» определены характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере Земли при нагреве ее F_2 -области мощным радиоизлучением среднеширотного стенда «Сура».

Научная и практическая ценность

В научном плане результаты, полученные в работе, дают основу для более глубокого понимания особенностей взаимодействия мощного электромагнитного излучения с магнитоактивной плазмой, условий и механизмов формирования на высотах внешней ионосферы и магнитосферы Земли крупномасштабных, вытянутых вдоль геомагнитного поля, неоднородностей – дактов плотности, влияния плазменных каналов на развитие неустойчивостей в околоземном пространстве и возможностей моделирования подобных явлений в лабораторных условиях.

Проведенные исследования имеют большое практическое значение, а их результаты могут быть использованы для разработки программ новых активных космических экспериментов и интерпретации их данных, в задачах дальней радиосвязи для возбуждения и каналирования низкочастотных волн большой амплитуды в ионосфере и магнитосфере Земли.

Полученные в диссертации результаты могут представлять интерес для следующих научно-исследовательских учреждений: ИКИ РАН, ИПФ РАН, ИЗМИРАН, НИРФИ, ААНИИ, ПГИ КНЦ РАН.

Публикации и апробация результатов

Изложенные в диссертации результаты докладывались на XXI и XXII Всероссийских конференциях по распространению радиоволн (Йошкар-Ола, 2005; Ростов-на-Дону, 2008), 3-й Международной научной конференции

«Фундаментальные проблемы физики» (Казань, 2005), 10-й и 11-й Научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2006, 2007), XIII Научной школе «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2006), XIII Международном конгрессе по физике плазмы (Киев, 2006), 5-й Международной школе молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» (Томск, 2006), Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (Таганрог, 2007), Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (Иркутск, 2007), VII Международном Суздальском симпозиуме URSI по искусственной модификации ионосферы (Москва, 2007), Генеральной Ассамблее EGU (Вена, 2008), XV Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Красноярск, 2008), XXIX Генеральной Ассамблее URSI (Чикаго, 2008), а также на семинарах НИРФИ и кафедры электродинамики радиофизического факультета ННГУ.

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в ведущих научных журналах [1 – 6], 5 работах в сборниках трудов международных и российских научных конференций [7, 12, 14, 21, 22], 11 тезисах докладов научных конференций, симпозиумов и школ [8 – 11, 13, 15 – 20].

Достоверность

Достоверность полученных результатов и выводов работы определяется физической обоснованностью проводимых экспериментальных исследований, большим объемом полученных данных, на основе которых делаются соответствующие выводы, повторяемостью результатов измерений, а также сопоставлением результатов исследований с данными других экспериментов и разработанными теоретическими моделями.

Личный вклад автора

Экспериментальные исследования, положенные в основу диссертационной работы, были выполнены на крупномасштабных экспериментальных установках.

Все эксперименты по лабораторному исследованию нелинейных волновых явлений в плазме ВЧ разряда были выполнены при непосредственном участии автора. Личный вклад его в этом направлении являлся определяющим при проведении численных расчетов и построении теоретических моделей наблюдаемых явлений.

В силу своей масштабности исследования воздействия мощного радиоизлучения на ионосферную плазму требовали привлечения для их выполнения большого научного коллектива. Личный вклад автора в эти исследования выразился в том, что автор принимал непосредственное участие в проведении основных экспериментов и интерпретации экспериментальных

данных. Лично автором были проведены обработка и анализ спутниковой телеметрической информации.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В лабораторных экспериментах, качественно моделирующих условия активных экспериментов по созданию искусственных периодических неоднородностей в нижней ионосфере Земли, наличие стоячей структуры волнового поля приводит к вынужденному рассеянию волнового пучка, формирующего разрядный канал, на релаксационных колебаниях решетки плазменных неоднородностей, создаваемой полем пучка.
2. В плазме с квазиоднородным распределением магнитного поля при малых давлениях газа, когда длина свободного пробега электронов превышает длину волны накачки и близка к продольному размеру системы, в результате распада высокочастотной волны накачки имеет место эффективное возбуждение ионно-звуковых волн. Многокаскадное рассеяние волн, формирующих разряд, на возбуждаемых ионно-звуковых колебаниях приводит к значительному уширению спектра сигнала накачки и влияет на величину высокочастотных потерь в плазме.
3. В линейной пробочной конфигурации магнитного поля для ВЧ разряда, позволяющего проводить качественное моделирование явлений в резонаторе магнитосферного типа с дактом повышенной плотности, присутствие достаточно интенсивных электронных потоков проявляется в шумовых излучениях в виде максимумов интенсивности сигнала на баунс частотах, соответствующих характерной энергии электронов. При наличии дополнительной накачки, по отношению к излучению, формирующему разряд, возможно возбуждение широкополосного шумового излучения с максимумом на частоте нижнегибридного резонанса.
4. При воздействии на F_2 -область ионосферы мощными КВ радиоволнами О-поляризации, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом «Сура», возможно формирование на высотах внешней ионосферы Земли вытянутых вдоль геомагнитного поля искусственных крупномасштабных возмущений (дактов плотности) с повышенной до 25 – 35 % относительно фонового уровня плотностью плазмы, в которых наблюдается повышение уровня сигналов ОНЧ передатчиков и уширение их частотного спектра, а также значительное увеличение интенсивности низкочастотных флуктуаций электромагнитных полей.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 42 рисунка и 4 таблицы. Список цитированной литературы содержит 136 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранного направления исследований, формулируется цель исследований и кратко излагается содержание диссертационной работы.

В **главе 1** приведено описание установок, на которых были выполнены экспериментальные исследования, составляющие основу диссертации. Рассмотрены основные методы диагностики плазмы, используемые в представленных экспериментах.

Раздел 1.1 посвящен лабораторным исследованиям. В **п. 1.1.1** приведены основные условия, предъявляемые к экспериментальным установкам для лабораторного моделирования физических процессов в околоземной плазме. Возможность моделирования основывается на так называемых законах подобия, указывающих на то, как должны соотноситься между собой основные безразмерные параметры, характеризующие данное явление в натуральных условиях и лабораторном эксперименте.

В **п. 1.1.2** содержится описание лабораторной исследовательской установки «Канал». Высокочастотный разряд формировался при самоканалировании волн свистового диапазона частот, возбуждаемых линейной квадрупольной антенной, размещенной в центральной части разрядного баллона, имеющего размеры: длина – 150 см, диаметр – 6 см. Мощность сигнала, подводимого к возбуждающим кольцам антенны от генератора ГСТ-2 ($f_0 = 200$ МГц), составляла порядка 50 Вт. Внешнее магнитное поле создавалось двумя соленоидами с автономными источниками питания, что позволяло проводить исследования как в случае однородного продольного магнитного поля, так и для варианта разряда в пробочной магнитной ловушке.

В проведенных экспериментах в качестве рабочего газа использовался воздух. Эксперименты проводились при давлениях от 10^{-2} до 10^{-5} Тор. Максимальная концентрация плазмы составляла 10^{12} см⁻³, а максимальная величина внешнего магнитного поля в экспериментах – 1500 Гс.

Возможность создания оторванного от стенок разрядного баллона плазменно-волнового канала, а также широкий диапазон изменения параметров плазмы и магнитного поля позволили на лабораторной установке «Канал», при соответствующем выборе условий эксперимента, проводить исследование ряда нелинейных явлений, протекающих в ионосферно-магнитосферной плазме при наличии искусственной неоднородности в виде вытянутого вдоль внешнего магнитного поля плазменного столба.

В п. 1.1.3 рассмотрены основные методы диагностики, использованные для исследования физических процессов в лабораторной плазме: анализ волновых явлений в разряде с помощью спектроанализаторов, регистрирующих сигнал с приемных дипольных и штыревых антенн, определение параметров плазмы с помощью многосеточного зонда, измерения концентрации СВЧ-интерферометром и по дисперсии поверхностных волн, направляемых разрядным каналом в продольном магнитном поле.

Раздел 1.2 посвящен натурным исследованиям. В проведенных экспериментах искусственные плазменные возмущения создавались при нагреве ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом «Сура» (НИРФИ, г. Нижний Новгород). Описание стенда и его основные характеристики приведены в п. 1.2.1.

В § 1.2.1.1 кратко изложены основные явления, наблюдаемые в экспериментах по модификации F -области ионосферы.

В п. 1.2.2 приведены использованные методы диагностики параметров ионосферной плазмы. Для наземной оперативной диагностики была задействована компьютеризированная ионосферная станция «Базис». Для определения характеристик плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы были проведены непосредственные (*in situ*) измерения с помощью бортовой научной аппаратуры спутника «DEMETER», которая описана в § 1.2.2.1.

В разделе 1.3 сформулированы заключительные замечания по главе 1.

Постановка и проведение активных волновых экспериментов по воздействию мощным электромагнитным излучением на плазму ионосферы и магнитосферы Земли стимулировали проведение подобных исследований и в лабораторных условиях.

Глава 2 посвящена лабораторным исследованиям неустойчивостей в магнитоактивной плазме ионосферного типа при наличии дакта плотности.

В разделе 2.1 описываются эксперименты по вынужденному ионизационному рассеянию [7*] волнового пучка, формирующего разрядный канал. Условия проводимых экспериментов рассмотрены в п. 2.1.1. Плазменный резонатор формировался в результате ВЧ разряда в пробочной магнитной ловушке. Эксперименты проводились при относительно высоких давлениях в разрядном баллоне, при которых значение длины свободного пробега электронов близко к половине длины волны накачки. Распределение вдоль разряда квадрата амплитуды продольной компоненты электрической составляющей ВЧ поля на частоте волны накачки показало наличие стоячей структуры волнового поля с характерным продольным масштабом $\sim 10 - 12$ см.

Полученные в данном разделе экспериментальные результаты представлены в п. 2.1.2. Анализ спектрального состава излучения, формирующего разрядный канал, показал, что в плазме разряда спектр поля накачки существенно уширяется, и появляются выделенные модуляционные

пики, которые наблюдаются в достаточно узком интервале давлений $P \sim 3 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ Тор. Частотный сдвиг между пиками зависит от условий разряда и меняется в пределах 1.4 – 1.8 МГц. При анализе низкочастотных шумовых излучений в плазме в указанном интервале параметров было обнаружено появление выделенных максимумов на частотах кратных основному колебанию на низшей частоте, соответствующей сдвигу между модуляционными пиками в спектре поля накачки.

В п. 2.1.3 рассмотрена физическая модель наблюдаемых явлений. Повышенная ионизация газа в пучностях электрического поля «стоячей» волны накачки приводит к возникновению решетки плазменных неоднородностей. Так как период решетки близок к половине длины волны накачки, то с ее появлением возникает сильное брегговское отражение. В результате чего амплитуда поля волны, формирующей разряд, уменьшается, плазменные неоднородности расплываются, отражение уменьшается, снова формируется стоячая структура поля накачки, и возникают плазменные неоднородности. Время расплывания неоднородностей определяется амбиполярной диффузией вдоль магнитного поля, что может быть использовано для диагностики плазмы.

В E -области ионосферы искусственные периодические неоднородности (ИПН) создаются под действием избыточного давления электронной компоненты плазмы, нагретой в пучностях стоячей радиоволны, образованной в результате интерференции излученной вертикально вверх и отраженной волн. Из сравнения параметров лабораторной и ионосферной (высоты нижней ионосферы) плазмы (п. 2.1.4) сделан вывод о возможности качественного моделирования ИПН и проведения исследований рассеяния радиоволн от решетки неоднородностей электронной концентрации на экспериментальной установке «Канал».

Раздел 2.2 посвящен исследованию генерации ионно-звуковых волн в плазме разрядного канала. В п. 2.2.1 описаны условия и результаты проводимых экспериментов. Исследования проводились в квазиоднородном вдоль продольной оси установки магнитном поле. Эксперименты были выполнены при достаточно низких давлениях ($P \sim 10^{-4}$ Тор), при которых длина свободного пробега электронов превышает длину волны накачки и близка к продольному размеру системы.

Анализ низкочастотного излучения плазмы показал наличие выделенного максимума в спектральной зависимости плотности мощности на частоте $f_{IA} = 70$ кГц. Проведенный дополнительный эксперимент по анализу акустических сигналов, принимаемых с помощью гидрофона, погруженного в целлофановый пакет с водой, находившейся в контакте с разрядным баллоном, показал, что регистрируемый сигнал по своей структуре соответствовал сигналу с электрической антенны и имел четко выделенный максимум на частоте f_{IA} .

В ВЧ области генерация низкочастотного излучения приводила к амплитудной модуляции и значительному частотному уширению сигнала волны накачки (спектр уширился в 1.5 раза по уровню -30 дБ).

В п. 2.2.2 обсуждены полученные в данном разделе экспериментальные результаты. Наиболее вероятным механизмом возбуждения ионно-звуковых волн является распадная неустойчивость волны накачки. В проведенных экспериментах частоты высокочастотных волн, участвующих в распадном взаимодействии, лежат внутри спектральной полосы сигнала накачки, поэтому эффект генерации ионного звука существенно усилен из-за биений в пондермоторной силе высокочастотного давления с подходящими волновыми числами k_{IA} и частотами f_{IA} , благодаря наличию спектральных составляющих сигнала накачки, удовлетворяющих условиям синхронизма.

Ионно-звуковые волны на высотах внешней ионосферы Земли могут возбуждаться в результате распада достаточно мощного сигнала ОНЧ передатчика. Параметры подобия лабораторной и ионосферной (высоты внешней ионосферы) плазмы приведены в **п. 2.2.3**.

В заключительном **разделе 2.3** второй главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенного в ней рассмотрения.

В **Главе 3** исследована генерация электромагнитных колебаний на частотах нижегибридного и баунс резонанса в резонаторе магнитосферного типа с дактом повышенной плотности.

В **разделе 3.1** описаны условия проводимых экспериментов. Плазменный резонатор магнитосферного типа создавался путем формирования ВЧ разрядом в свистовом диапазоне частот неоднородного плазменного волновода в продольном магнитном поле пробочной конфигурации. При этом распределение вдоль продольной оси установки магнитного поля, концентрации плазмы и поперечного радиуса канала являлось подобным распределению этих величин в магнитосферном резонаторе с дактом повышенной плотности плазмы. Неравновесность плазмы обеспечивалась той частью горячих разрядных электронов, которые заперты в ловушке из-за большой поперечной составляющей скорости.

Экспериментальные результаты представлены в **разделе 3.2**. Стационарное распределение электрического потенциала вдоль продольной оси системы представляет собой потенциальную яму для электронов и, при низких давлениях в разряде ($P < 10^{-4}$ Тор), когда длина свободного пробега электронов становится порядка или больше размеров установки, частицы могут совершать баунс колебания между магнитными пробками.

Из полученной при этих параметрах зависимости спектральной плотности мощности принятого сигнала видно появление широкополосного максимума на частоте $f_b \sim 800$ кГц. Исследована зависимость положения этого максимума от параметров разряда.

Значительное повышение уровня шумовых излучений регистрируется также в окрестности 4 МГц в тех случаях, когда на дополнительную

квадрупольную антенну, размещаемую в области перед магнитными пробками, подавался сигнал с ВЧ генератора амплитудой 400 В на частоте 3.4 МГц.

Обсуждение экспериментальных результатов приведено в **разделе 3.3**. Наблюдаемая генерация широкополосного шумового излучения с максимумом на частоте ~ 800 кГц может быть объяснена группировкой потока тепловых электронов разряда и возбуждением, модулированным потоком частиц, квазипотенциальных колебаний в сформированном разрядом плазменном резонаторе. Резонатор выделяет из теплового шума на собственной частоте колебаний пучка излучение сгруппированных частиц со скоростями, определяемыми размерами резонатора. Прежде всего, выделяется максимум, соответствующий наиболее характерной тепловой скорости электронов. Этот факт позволяет по наблюдаемому шумовому пику излучения оценивать температуру электронов в разряде.

При наличии дополнительной ВЧ накачки количество высокоэнергичных электронов заметно увеличивается, и в плазменном столбе появляются движущиеся осцилляторы, которые в полосе частот около 3.4 МГц накачивают шумовое излучение в плазме.

Численное моделирование волновых процессов в отрезке плазменного волновода с однородным распределением плотности заряженных частиц в поперечном сечении разрядного канала и заданным по результатам измерений продольным кусочно-однородным распределением магнитного поля и концентрации плазмы показало наличие резонанса для основной осесимметричной моды в окрестности нижнегибридного резонанса на частоте 4 МГц. Максимум интенсивности сигнала приходится на частоту нижнегибридного резонанса, т.к. наибольшее замедление, необходимое для обеспечения обратной связи для эффективной группировки быстрых электронов и резонансного усиления возбуждаемых колебаний, волны испытывают на этой частоте.

В **разделе 3.4** лабораторные исследования проиллюстрированы результатами натурального ракетного эксперимента в ионосфере Земли. Формирование искусственных дактов плотности в магнитосфере Земли было реализовано в ракетных экспериментах «Активный шнур».

Из работы [8*] приведены данные о влиянии плазмы разряда на потоки высыпающихся электронов. Показано, что формирование искусственных дактов плотности приводит к значительному увеличению потока высыпающихся частиц, в вариациях которого выделяется максимум, отвечающий частотам баунс осцилляций быстрых электронов с энергией ≥ 40 кэВ. Возрастание потока высыпающихся частиц сопровождается увеличением шумовых КНЧ излучений в данной силовой трубке, что может быть использовано для активной диагностики радиационных поясов и процессов, происходящих в магнитосфере Земли.

Выводы по третьей главе сформулированы в **разделе 3.5**.

Глава 4 посвящена исследованию искусственных плазменно-волновых каналов, формируемых при нагреве ионосферы Земли мощным

КВ радиоизлучением стенда «Сура». В рамках проводимых исследований, была впервые предпринята попытка проведения на регулярной основе измерений на высотах внешней ионосферы Земли параметров плазмы и электромагнитных полей в области возмущенной мощным КВ радиоизлучением магнитной силовой трубки.

В разделе 4.1 представлены теоретические оценки параметров искусственных дактов плотности, формируемых при локальном нагреве ионосферы.

Приведенные в работах [9*, 10*] оценки дают довольно оптимистичный прогноз, согласно которому относительные возмущения электронной концентрации на высотах внешней ионосферы и в магнитосфере Земли могут достигать значения десяти и более процентов при разумных значениях величины искусственного нагрева ионосферы.

В разделе 4.2 представлена схема проведения эксперимента «Сура» – «DEMETER». Основные результаты измерений характеристик искусственных электромагнитных и плазменных возмущений приведены в разделе 4.3.

Измерения, выполненные в дневных условиях, а также когда ИСЗ «DEMETER» находился в магнитосопряженной относительно расположения стенда точке, не дали значимых результатов. Не было обнаружено каких-либо искусственных плазменных возмущений и в случае, когда нагрев ионосферы проводился либо на частоте f_{pump} , значение которой было выше критической частоты F_2 -области (f_{0F2}), либо при малых (< 40 МВт) мощностях волны накачки, а также когда траектория спутника проходила достаточно далеко (> 100 км) от оси возмущенной силовой трубки. Последнее условие могло быть выполнено всего 1 – 2 раза в месяц, поэтому за четыре года (2005 – 2008 годы) было проведено всего 10 сеансов, удовлетворяющих представленным требованиям, из которых в четырех сеансах нагрева бортовой аппаратурой спутника были зарегистрированы крупномасштабные искусственные возмущения с повышенной до 25 – 35 % относительно фонового уровня плотностью плазмы (п. 4.3.1). Характерный пространственный масштаб вдоль траектории ИСЗ наблюдаемых плазменных каналов составлял ~ 50 км.

В области искусственного дакта плотности наблюдались также вариации температуры электронов ($\Delta T_e/T_e \sim 0.2$).

Сопоставление полученных данных с результатами измерений, выполненных с помощью метода спутниковой радиотомографии, представлено в § 4.3.1.1. Измеренные этими методами характерные поперечные размеры вытянутых вдоль геомагнитного поля искусственных неоднородностей и значения повышенной относительно фона плотности плазмы в них хорошо согласуются между собой. Сопоставление с результатами измерений, выполненных с помощью метода спутниковой радиотомографии, показало, что искусственные крупномасштабные возмущения плотности плазмы пронизывают фактически все тело ионосферы

от области отражения волны накачки в F_2 -слое до высот внешней ионосферы и магнитосферы Земли.

В п. 4.3.2 приведены характеристики возмущений электромагнитных полей в области искусственного дакта плотности. Обнаружено, что в области искусственного плазменного канала, наблюдается высокий уровень флуктуаций электромагнитных полей в низкочастотной части диапазона, усиление ВЧ шумов, а также наблюдается значительное увеличение интенсивности сигналов ОНЧ передатчиков и уширение их частотного спектра.

Результаты спутниковых измерений характеристик электромагнитных возмущений обсуждены в § 4.3.2.1. Появление узкополосного достаточно интенсивного сигнала в высокочастотной части спектрального диапазона связано с возбуждением высокочастотных плазменных шумов выходящим из возмущенной области ионосферы потоком энергичных электронов, ускоряемых до надтепловых энергий в области интенсивной плазменной турбулентности.

Значительное повышение уровня сигнала на частоте 18.1 кГц в области возмущенной магнитной силовой трубки связано с захватом и каналированием излучения ОНЧ передатчика в искусственном волноводном канале. Значение напряженности поля ОНЧ передатчика превышает необходимые пороговые поля для возбуждения параметрической неустойчивости на высотах внешней ионосферы Земли. Развитие неустойчивости приводит к индуцированному рассеянию и распадному взаимодействию свистовой волны, что может вызывать уширение спектра передатчика, а также приводить к усилению КНЧ и ОНЧ шумов в искусственном дакте плотности.

В разделе 4.4 из анализа всей совокупности полученных данных определены экспериментальные условия, при которых наблюдалось формирование крупномасштабных возмущений с повышенной плотностью плазмы – искусственных дактов плотности. Невыполнение этих условий объясняет отсутствие крупномасштабных возмущений плотности плазмы в остальных проведенных сеансах нагрева.

В разделе 4.5 изложены основные выводы по четвертой главе.

В заключении приведены основные результаты проведенных в диссертации исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Показана сильная зависимость спектров вынужденных колебаний в плазменно-волновом канале от соотношения длины свободного пробега электронов l_e с характерным размером системы L и длинами волн пучка λ , формирующего разряд. Для параметров разряда ($l_e \leq \lambda/2$), качественно соответствующих условиям активных экспериментов по созданию искусственных периодических неоднородностей в нижней ионосфере Земли, обнаружено и исследовано вынужденное

ионизационное рассеяние волнового пучка, формирующего протяженный разрядный канал в пробочной магнитной ловушке, на релаксационных колебаниях решетки плазменных неоднородностей, создаваемой полем пучка.

2. Проведено исследование генерации ионно-звуковых волн, возбуждаемых в результате распада высокочастотной волны, формирующей разрядный канал. Показано, что эффективное возбуждение ионно-звуковых волн возможно когда длина свободного пробега электронов становится сравнимой с характерным размером системы ($l_e \sim L$). Установлено, что дисперсионные свойства волновода накладывают определенные ограничения на частоты и длины волн, возбуждаемых в плазме, в результате чего генерация ионно-звуковых волн имеет «резонансный» характер.
3. В плазменно-волновом разряде в пробочной магнитной ловушке при моделировании явлений в магнитосферном резонаторе с дактом повышенной плотности плазмы ($l_e > L$) обнаружена генерация широкополосного шумового излучения на частотах баунс колебаний электронов плазмы разряда. При наличии дополнительной накачки, по отношению к излучению, формирующему разряд, показана возможность возбуждения широкополосного шумового электромагнитного излучения с максимумом на частоте нижнегибридного резонанса.
4. Путем непосредственных (*in situ*) спутниковых измерений на высотах внешней ионосферы Земли экспериментально обнаружено формирование искусственных волноводных каналов в области возмущенной мощным КВ радиоизлучением стенда «Сура» магнитной силовой трубки.
5. Определены экспериментальные условия формирования искусственных волноводных каналов на высотах внешней ионосфере Земли при нагреве ее F_2 -области мощными КВ радиоволнами, излучаемыми наземным передатчиком.
6. Определены характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере Земли радиоизлучением стенда «Сура». Показано, что в области дакта плотности плазмы наблюдаются значительные вариации температуры электронов, имеет место повышение уровня сигналов ОНЧ передатчиков и уширение их частотного спектра, а также значительное увеличение интенсивности низкочастотных флуктуаций электромагнитных полей.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Белов, А.С. Генерация звуковых волн ВЧ разрядом геликонного типа / А.С. Белов, Г.А. Марков // Физика плазмы. – 2006. – Т. 32, № 9. – С. 826-831.
2. Рапопорт, В.О. Некоторые результаты измерений характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ радиоизлучением стенда Сура / В.О. Рапопорт, В.Л. Фролов, Г.П. Комраков, Г.А. Марков, А.С. Белов, М. Парро, Ж.Л. Рош // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 8. – С. 709-721.
3. Белов, А.С. Вынужденное ионизационное рассеяние волнового пучка, формирующего разрядный канал в пробочной магнитной ловушке / А.С. Белов, Г.А. Марков // Физика плазмы. – 2008. – Т. 34, № 3. – С. 252-256.
4. Фролов, В.Л. Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура» / В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Г.П. Комраков, А.С. Белов, Г.А. Марков, М. Парро, Ж.Л. Рош, Е.В. Мишин // Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 11. – С. 915-925.
5. Фролов, В.Л. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением / В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Г.П. Комраков, А.С. Белов, Г.А. Марков, М. Парро, Ж.Л. Рош, Е.В. Мишин // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. 88, В. 12. – С. 908-913.
6. Белов, А.С. Генерация электромагнитных колебаний на частотах нижнегибридного и баунс резонанса в пробочных магнитных ловушках (лабораторные и ракетные эксперименты) / А.С. Белов, Г.А. Марков, Л.Л. Попова, Ю.В. Чугунов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2009. – Т. 49, № 2. – С. 199-208.
7. Белов, А.С. Генерация ионно-звуковых волн ВЧ разрядом геликонного типа / А.С. Белов, Г.А. Марков // XXI Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: труды конференции (Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005 г.). – Йошкар-Ола, 2005. – С. 40-44.
8. Белов, А.С. Генерация звуковых волн в геликонном разряде / А.С. Белов, Г.А. Марков // 3-я Международная научная конференция «Фундаментальные проблемы физики»: труды конференции (Казань, 13-18 июня 2005 г.). – Казань, 2005. – С. 206.
9. Белов, А.С. Генерация звуковых волн в магнитоактивной плазме / А.С. Белов, Г.А. Марков // XIII научная школа «Нелинейные волны – 2006»: труды конференции (Н. Новгород, 1-7 марта 2006 г.). – Н. Новгород, 2006. – С. 20-21.

10. Белов, А.С. Генерация низкочастотных излучений неравновесной плазмой геликонного разряда в пробочной магнитной ловушке / А.С. Белов, Г.А. Марков // Десятая научная конференция по радиофизике: труды конференции (Н. Новгород, 5 мая 2006 г.). – Н. Новгород, 2006. – С. 55-56.
11. Belov, A.S. Laboratory modeling and artificial stimulation of the magnetospheric maser effects / A.S. Belov, Yu.V. Chugunov, G.A. Markov, L.L. Popova // 13th International Congress on Plasma Physics: proceedings (Kiev, 22-26 May 2006). – Kiev, 2006. – P. 159.
12. Белов, А.С. Лабораторное моделирование магнитосферных мазерных эффектов / А.С. Белов, Г.А. Марков // 5-ая Международная школа молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды»: материалы школы (Томск, 26 июня – 2 июля 2006 г.). – Томск, 2006. – С. 9-13.
13. Белов, А.С. Вынужденное ионизационное рассеяние волн накачки в лабораторной модели магнитосферного резонатора с дактом повышенной плотности / А.С. Белов, Г.А. Марков // Одиннадцатая научная конференция по радиофизике: труды конференции (Н. Новгород, 7 мая 2007 г.). – Н. Новгород, 2007. – С. 5-6.
14. Белов, А.С. Лабораторное моделирование высокочастотного стимулирования мазерных эффектов в магнитосфере Земли / А.С. Белов, Г.А. Марков // Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн»: труды конференции (Таганрог, 25-30 июня 2007 г.). – Таганрог, 2007. – Т. 2. – С. 42-45.
15. Белов, А.С. Вынужденное рассеяние волн накачки на релаксационных колебаниях решетки плазменных неоднородностей в пробочной магнитной ловушке / А.С. Белов, Г.А. Марков // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике: тезисы докладов (Иркутск, 17-22 сентября 2007 г.). – Иркутск, 2007. – С. 36.
16. Belov, A.S. Laboratory modeling of resonant and nonstationary wave phenomena in the magnetospheric resonator with an enhanced-density duct / A.S. Belov, G.A. Markov // VII Suzdal URSI Symposium on Modification of the ionosphere by powerful radio waves: proceedings (Moscow, 16-18 October 2007). – Moscow, 2007. – P. 52.
17. Frolov, V.L. First results of the Sura-DEMETER experiments / V.L. Frolov, G.P. Komrakov, Rapoport V.O., N.A. Ryzhov, G.A. Markov, A.S. Belov, M. Parrot, J.L. Rauch // VII Suzdal URSI Symposium on Modification of the ionosphere by powerful radio waves: proceedings (Moscow, 16-18 October 2007). – Moscow, 2007. – P. 57-58.
18. Frolov, V. Phenomena observed by HF heating of middle- and high-latitude ionosphere and registered at altitudes of about 700 km with DEMETER instruments / V. Frolov, G. Komrakov, V. Rapoport, N. Ryzhov, A. Belov,

- G. Markov, M. Parrot, J. Rauch, M. Rietveld // EGU General Assembly: geophysical research abstracts (Vienna, 13-18 April 2008). – Vienna, 2008. – Vol. 10. – EGU2008-A-03872.
19. Belov, A.S. Outer ionosphere disturbances stimulated by the powerful HF radio emission from the heating facilities / A.S. Belov, G.A. Markov, V.L. Frolov, V.O. Rapoport, M. Parrot, M. Rietveld // XV International Symposium «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics»: proceedings (Krasnoyarsk, 22-28 June 2008). – Krasnoyarsk, 2008. – P. 181.
 20. Frolov, V.L. Spatial structure of the ionosphere modified by powerful HF radio waves / V.L. Frolov, V.O. Rapoport, A.S. Belov, G.A. Markov, E.D. Tereshchenko, B.Z. Khudukon, M. Parrot // XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI): proceedings (Chicago, 7-16 August 2008). – Chicago, 2008. – GNEp5.
 21. Фролов, В.Л. Результаты спутниковых измерений характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, генерируемых в ионосфере Земли радиоизлучением стенда Сура / В.Л. Фролов, Г.П. Комраков, В.О. Рапопорт, Е.Д. Терещенко, А.Н. Миличенко, Р.Ю. Юрик, Б.З. Худукон, Г.А. Марков, А.С. Белов, М. Парро, Ж.Л. Рош // XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: труды конференции (Ростов-на-Дону, 22-26 сентября 2008 г.). – Ростов-на-Дону, 2008. – Т. 1. – С. 47-51.
 22. Фролов, В.Л. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением стенда Сура / В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Г.П. Комраков, А.С. Белов, Г.А. Марков, М. Парро, Ж.Л. Рош // XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: труды конференции (Ростов-на-Дону, 22-26 сентября 2008 г.). – Ростов-на-Дону, 2008. – Т. 2. – С. 222-225.

ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

- 1*. Гинзбург, В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967. – 684 с.
- 2*. Гуревич, А.В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере / А.В. Гуревич, А.Б. Шварцбург. – М.: Наука, 1973. – 272 с.
- 3*. Марков, Г.А. О самоканализации плазменных волн в магнитном поле / Г.А. Марков, В.А. Миронов, А.М. Сергеев // Письма в ЖЭТФ. – 1979. – Т. 29, В. 11. – С. 672-676.
- 4*. Голубятников, Г.Ю. Исследование пространственной динамики нагрева и термодиффузии плазмы / Г.Ю. Голубятников, С.В. Егоров, А.В. Костров, В.А. Миронов, Ю.В. Чугунов // Физика плазмы. – 1988. – Т. 14, В. 4. – С. 482-486.
- 5*. Demekhov, A.G. Current problems in studies of magnetospheric cyclotron masers and new space project «Resonance» / A.G. Demekhov,

- V.Y. Trakhtengerts, M.M. Mogilevsky, L.M. Zelenyi // *Adv. Space Res.* – 2003. – Vol. 32, № 3. – P. 355-374.
- 6*. Inan, U.S. Controlled precipitation of radiation belt electrons / U.S. Inan, T.F. Bell, J. Bortnik, J.M. Albert // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108, № A5. – P. SMP6 1-11.
- 7*. Гильденбург, В.Б. Ионизационные неустойчивости электромагнитной волны / В.Б. Гильденбург, А.В. Ким // *ЖЭТФ.* – 1978. – Т. 74, № 1. – С. 141-147.
- 8*. Chugunov, Yu.V. Active plasma antenna in the Earth's ionosphere / Yu.V. Chugunov, G.A. Markov // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* – 2001. – Vol. 63, № 17. – P. 1775-1787.
- 9*. Борисов, Н.Д. О возможности образования магнитосферных дактов при локальном нагреве ионосферы / Н.Д. Борисов, И.П. Золотарев // *Геомагнетизм и аэрномия.* – 1983. – Т. 23, № 5. – С. 797-803.
- 10*. Perrine, R.P. An interhemispheric model of artificial ionospheric ducts / R.P. Perrine, G.M. Milikh, K. Papadopoulos, J.D. Huba, G. Joyce, M. Swisdak, Y. Dimant // *Radio Sci.* – 2006. – Vol. 41, № 4. – P. RS4002 1-13.

БЕЛОВ Алексей Сергеевич

**ИСКУССТВЕННЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ КАНАЛЫ
В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ:
ЛАБОРАТОРНЫЕ И НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано к печати 22.05.2009. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 323. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии
Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37
Лицензия ПД № 18-0099 от 14.05.01