

На правах рукописи



Болотин Илья Александрович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ
МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена в Научно-исследовательском радиофизическом институте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, с.н.с.
Фролов Владимир Леонтьевич,
НИРФИ ННГУ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Мясников Евгений Николаевич,
ФГБОУ «Волжский государственный университет водного транспорта»,
заведующий кафедрой физики

кандидат физико-математических наук,
Гущин Михаил Евгеньевич,
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук», заведующий лабораторией

Ведущая организация: ФГБУН Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В. Пушкова Российской академии наук

Защита состоится «05» июня 2019г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: Нижний Новгород, пр. Гагарина 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета ННГУ им. Н.И. Лобачевского по адресу <https://diss.unn.ru/files/2019/904/diss-Bolotin-904.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

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



Клюев
Алексей
Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Исследование взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с ионосферой Земли является одной из фундаментальных задач настоящего времени. Она представляет значительный интерес как одна из областей освоения околоземного космического пространства. Впервые изменение свойств ионосферы в поле мощных радиоволн было обнаружено в 1933 г., когда был открыт Люксембург-Горьковский эффект [1, 2]. Исследование данного эффекта привело к развитию теорий взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой [3, 4], которые получили подтверждение в наблюдениях и послужили источником важных сведений о свойствах ионосферы [5-8]. Нелинейные явления при распространении мощных радиоволн в ионосфере Земли были рассмотрены в обзоре [8], результаты выполненных в этом направлении исследований были собраны в монографиях [9, 10]. Широкое развитие данное направление получило в 70 – 80х годах, когда были построены первые специализированные коротковолновые стенды для воздействия на ионосферу. Дальнейшие исследования показали, что воздействие мощным КВ радиоизлучением на ионосферу Земли приводит к развитию целого комплекса явлений и, как следствие этого, к генерации искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). Генерация ИИТ происходит в результате омического разогрева ионосферной плазмы, генерации стрикционной и тепловой (резонансной) параметрических неустойчивостей мощной волны О-поляризации вблизи точки её отражения, развития самофокусирующей неустойчивости пучка мощных радиоволн. Всё это приводит к нагреву плазмы, к деформации профиля плазмы вблизи уровня отражения мощной радиоволны (волны накачки, ВН), к возбуждению здесь высокочастотных и низкочастотных плазменных колебаний и искусственных неоднородностей плотности плазмы с поперечными относительно линий геомагнитного поля масштабами от долей метра до десятков километров, к ускорению электронов до сверхтепловых энергий в областях с интенсивной плазменной турбулентностью и связанной с ними генерации искусственных оптических свечении и искусственной ионизации, к возбуждению электрических полей и токов, к генерации искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) и др. Результаты выполненных исследований свойств ИИТ суммированы в монографиях [10, 11], в обзорах и статьях в специальных выпусках журналов [13-20] и в обзорах [21-27].

Решение проблем, связанных с эффектами турбулизации плазмы в поле мощной электромагнитной волны, востребовано в различных областях знаний, среди которых отметим физику околоземного космического пространства, распространение радиоволн в плазмopodobных средах, физику низкотемпературной плазмы, астрофизику, физику Солнца и др. Стоит также отметить, что мощности работающих сегодня в мире радиостанций

различного назначения достаточны, чтобы вызывать заметные изменения характеристик ионосферной плазмы. Можно сказать, что ионосфера в настоящее время, фактически, постоянно находится в возбуждённом состоянии, и это необходимо принимать во внимание при рассмотрении протекающих в ней процессов.

Выполненные за прошедшие годы исследования позволили определить основные свойства возбуждаемой мощной радиоволной ИИТ и развить теоретические модели для генерации различных её компонент. Исследования, выполненные в последние несколько лет на среднеширотном нагревом стенде «Сура» (Васильсурск, Россия), дав новую важную информацию об индуцированных мощной радиоволной плазменных возмущениях, поставили ряд требующих своего решения вопросов. Данная диссертационная работа посвящена исследованиям по четырём основным направлениям:

- Одной из наиболее важных компонент ИИТ являются искусственные ионосферные неоднородности (ИИН), которые возбуждаются в широком диапазоне поперечных к геомагнитному полю масштабов от долей метра до десятка и более километров. Изучение их спектральных и динамических характеристик даёт возможность исследовать свойства индуцируемых мощной радиоволной неустойчивостей, изучать особенности динамических процессов в ионосфере, а также определять возможное влияние ИИН на распространение радиоволн различных диапазонов. Неизученным участком спектра ИИН оставались неоднородности с размерами ~ 100 м поперёк силовым линиям геомагнитного поля. Как показали первые исследования [A1], ИИН указанных размеров генерируются весьма интенсивно. Они вызывают рассеяние и рефракцию проходящих через них радиоволн и существенно влияют на образование F_{spread} . Таким образом, значительный интерес представляет определение механизмов генерации таких ИИН.
- При воздействии на ионосферу мощным КВ радиоизлучением на частоте близкой к гармонике гирочастоты электрона (nf_{ce}) имеет место многократный гироманнитный резонанс. В [28] авторы предсказали генерацию сверхмелкомасштабных (с размерами поперёк геомагнитного поля порядка 10 см) интенсивных искусственных неоднородностей (СМИН) плотности плазмы, когда частота ВЧ немного выше nf_{ce} . На данный момент стоит задача экспериментального подтверждения данной гипотезы и измерения свойств и характеристик СМИН.
- Последние исследования на стенде «Сура» показали, что волны необыкновенной (X) поляризации способны возбуждать неоднородности различных масштабов, хоть и с меньшей интенсивностью, чем волны обыкновенной поляризации [A4]. В том

числе, наблюдается генерация крупномасштабной ИИТ в масштабах диаграммы направленности нагревного стенда. Такая ИИТ оказывает влияние на сигналы навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, что значительно повышает интерес к более подробному изучению взаимодействия радиоволн Х-поляризации с ионосферной плазмой. Воздействие мощными радиоволнами Х-поляризации, проходящее без резонансного взаимодействия ВН с плазмой и генерации интенсивной ИИТ, позволяет исследовать эффекты обусловленные омическим нагревом плазмы и развитием самофокусирующей неустойчивости. Здесь можно исследовать особенности генерации ИИТ на больших градиентах концентрации и температуры ионосферной плазмы (например, на краях диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн).

- Одним из значимых результатов, полученных в результате исследований на стенде «Сура» в последние несколько лет, является обнаружение формирования на высотах внешней ионосферы вытянутых вдоль силовых линий геомагнитного поля крупномасштабных неоднородностей с увеличенной плотностью плазмы (дактов), которые имеют размеры поперек магнитного поля ~ 100 км [29-31]. Определение возможностей и условий искусственного формирования на высотах внешней ионосферы и в магнитосфере Земли дактов плотности плазмы, которые, как это рассматривалось ещё в работе [32], могут служить в качестве каналов для распространения радиоволн ОНЧ диапазона (вистлеров), является важной задачей современных геофизических исследований. Её решение имеет различные области применения, включая модификацию магнитосферной плазмы ОНЧ–НЧ радиоволнами, распространяющимися в таких дактах.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является развитие на основе полученных экспериментальных данных эмпирической модели формирования пространственной структуры плазменных возмущений, развивающихся в верхней ионосфере Земли при её модификации пучком мощных КВ радиоволн.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие научно-технические задачи:

1. Определение механизмов генерации ИИТ с размерами ~ 100 м поперёк силовых линий геомагнитного поля.
2. Экспериментальное исследование спектральных и динамических характеристик неоднородностей плотности плазмы, генерируемых при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами с частотой близкой к гармонике гирочастоты электрона;

3. Исследование особенностей генерации ИИН различных масштабов при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами необыкновенной поляризации
4. Исследования генерации искусственной ионосферной турбулентности на высотах внешней ионосферы

Методы исследований

Для решения поставленных в диссертационной работе задач для модификации состояния ионосферы используются мощные радиоволны, излучаемые нагревным стендом «Сура» (ННГУ, Н. Новгород).

Для диагностики искусственных плазменных возмущений использовались следующие основные методы и способы: метод вертикального зондирования сигналами ионосферных станций, метод пробных волн, ракурсное рассеяние радиоволн СВ, КВ и УКВ диапазонов, зондирование ВО ионосферы сигналами ИСЗ, включая сигналы ИСЗ навигационных систем GPS/GLONASS, метод низкоорбитальной радиотомографии, прямые измерения вариаций плотности и температуры плазмы с борта ИСЗ, метод искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ).

Компьютерное моделирование и обработка полученных экспериментальных данных выполнены в программной среде Matlab.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается как в постановке нерешенных ранее задач, так и в полученных оригинальных результатах:

1. Впервые проведено детальное исследование свойств ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м и сделаны выводы о механизмах их генерации. Установлено, что на генерацию ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м оказывают влияние резонансные эффекты взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой. С другой стороны, генерация ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м возможна и в отсутствие резонансных эффектов.
2. Впервые продемонстрировано соответствие характеристик уширения спектра рассеянного на декаметровых неоднородностях сигнала и быстро релаксирующих после выключения ВН флуктуаций величины полного электронного содержания (total electron content – TEC). Показано, что максимум обоих эффектов наблюдается в области «магнитного зенита» для ВН при отстройке частоты ВН от четвёртой гармоники гирочастоты электрона $\delta f_{\max} = f_{\text{ВН}} - 4f_{\text{ce}} \approx 30 - 60$ кГц. Эти эффекты могут быть объяснены в рамках высказанной в [28] гипотезы о генерации сверхмелкомасштабных неоднородностей и тем самым служить её косвенным подтверждением.
3. Впервые установлено, что спектр ИИН при X-модификации среднеширотной ионосферы ВН с мощностью $P_{\text{эфф}} \leq 100$ МВт

обрывается для неоднородностей с $l_{\perp} < 50$ м, по сравнению со случаем О-нагрева его спектральная интенсивность в несколько раз слабее в области масштабов 50 м – 3 км и имеет, по крайней мере, на порядок более слабую спектральную интенсивность в области масштабов $l_{\perp} \geq 5$ км.

4. Впервые выполнены исследования свойств плазменных возмущений в области высот 450 – 500 км, которая является переходной от области ионосферы вблизи высоты отражения волны накачки, где происходит интенсивная генерация ИИТ и формирование полости с пониженной концентрацией плазмы, к области высот внешней ионосферы, где регистрируется формирование дактов с повышенной концентрацией плазмы внутри возмущённой магнитной силовой трубки. На высотах 450 – 500 км не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы с размерами ~ 100 км поперёк линий геомагнитного поля, которые регистрировались на высотах ~ 660 км. Было установлено, что на этих высотах наблюдаются более сильные вариации температуры электронов (T_e) и увеличение среднего T_e по сравнению с высотами ~ 660 км.

Научная и практическая ценность работы

Решение поставленных в работе задач востребовано в различных областях знаний, среди которых стоит отметить физику околоземного космического пространства, распространение радиоволн в плазмоподобных средах, физику низкотемпературной плазмы, астрофизику, физику Солнца и др. Исследуемые в работе эффекты необходимо принимать во внимание при рассмотрении протекающих в ионосфере процессов.

Достоверность полученных результатов подтверждается физической обоснованностью проводимых экспериментальных исследований, большим объемом полученных данных, на основе которых делаются соответствующие выводы, повторяемостью результатов измерений, взаимодополняемостью результатов, полученных при использовании различных методов измерений, а также сопоставлением результатов исследований с разработанными теоретическими моделями и с результатами, полученными на других нагревных стендах.

На защиту выносятся следующие результаты и положения:

1. Результаты экспериментальных исследований механизмов генерации ИИТ в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м, включающих:
 - а. оценки зависимости интенсивности генерации неоднородностей от отстройки частоты волны накачки от четвертой гармоники гирочастоты электрона;

- b. определение влияния прохождения частотой волны накачки критической частоты F_2 -слоя на генерацию неоднородностей;
 - c. сравнительный анализ особенностей генерации неоднородностей при модификация ионосферной плазмы волнами с обыкновенной и необыкновенной поляризациями;
 - d. выводы о влиянии как резонансных, так и нерезонансных эффектов на генерацию ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м.
2. Экспериментальное исследование свойств искусственных ионосферных неоднородностей и определение особенностей их генерации по результатам исследования характеристик уширения спектра рассеянного на декаметровых неоднородностях сигнала и флуктуаций ТЕС при импульсном гирогармоническом нагреве.
 3. Результаты экспериментального исследования характеристик ИИН с масштабами l_{\perp} от 10 м до 10-15 км при воздействии на ионосферу волнами необыкновенной поляризации.
 4. Результаты экспериментального исследования особенностей генерации искусственной ионосферной турбулентности на высотах внешней ионосферы ~ 500 км, ~ 660 км и ~ 840 км.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 24 работы. Среди них 9 статей в рецензируемых изданиях (“Известия вузов. Радиофизика” [A1 – A7], “Известия вузов. Физика” [A8], “Гелиогеофизические исследования” [A9]), в которых представлены все выносимые на защиту результаты диссертации, 15 работ, представляющих собой опубликованные материалы докладов на конференциях [A10 – A24].

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Ежегодные научные конференции по радиофизике (ННГУ, Н. Новгород, май 2012 г).
- Всероссийские конференции по распространению радиоволн (2011, 2014, 2016)
- Международные конференции (AIS-2012, AIS-2016, RSEMW 2011, 2017)

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 11-02-00374 (2011-2013 гг.), № 12-02-31839 (2012-2013 гг.), № 12-05-33065 (2012-2013 гг.), № 13-05-9705 (2013-2014 гг.), 17-05-00475 (2017-2018 гг.), гранта РФФИ № 14-12-00556 (2014-2016 гг.), государственного задания Минобрнауки России (проект № 3.1844.2017/ПЧ)

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в получении всех результатов, изложенных в диссертационной работе. Он участвовал в

постановке задач, проведении экспериментальных исследований на нагревном стенде «Сура», обработке полученных экспериментальных данных, выполнении аналитических расчетов и математического моделирования, а также в обсуждении полученных результатов и подготовки их к печати.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 141 страницу, включая 30 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 137 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы исследования, изложено современное состояние подобных исследований в мире, проведен краткий обзор литературы по теме диссертации, приведены результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассмотрена задача исследования особенностей генерации ИИН с $l_{\perp} \sim 100$ м и определения природы возможных механизмов их генерации.

В разделе 1.1 приведена методика диагностики ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м и описана область её применения, подтвержденная траекторными расчётами. Диагностика таких ИИН осуществляется с помощью ионозонда, расположенного в 170 км к востоку от стенда. Благодаря широкой диаграмме направленности он способен зондировать возмущённую область ионосферы над стендом «Сура». Влияние исследуемых ИИН отражается в виде дополнительных диффузных следов на снимаемых ионограммах. Обработка ионограмм и выполненные траекторные расчеты показали, что данная методика позволяет исследовать ИИН в диапазоне масштабов $l_{\perp} \approx 50 - 200$ м во всей толще ионосферы — от высот E -области до высот максимума F_2 -слоя

В разделе 1.2 описан цикл экспериментальных исследований свойств ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м.

В разделе 1.2.1 представлены результаты оценки зависимости интенсивности генерации ИИН от отстройки частоты волны накачки от четвертой гармоники гирочастоты электрона. Показано, что генерация исследуемых ИИН обладает гирогармоническими свойствами, а значит, в механизмах их генерации должны играть роль высокочастотные плазменные волны, появляющиеся в результате резонансных эффектов взаимодействия мощных радиоволн с ионосферой.

В разделе 1.2.2 исследуется влияние прохождения частотой волны накачки критической частоты F_2 -слоя на генерацию ИИН.

Обнаружено, что при переходе через критическую частоту не наблюдается резкого уменьшения интенсивности рассеянного сигнала; он продолжает регистрироваться вплоть до превышения на 100 – 200 кГц частотой волны накачки значения f_{oF2} , т.е. пока частота верхнегибридного резонанса остается меньше критической частоты f_{oF2}

В разделе 1.2.3 представлены результаты исследования особенностей генерации ИИН при модификации ионосферной плазмы волнами с необыкновенной поляризацией. Полученные результаты ясно указывают на то, что генерация ИИН с размерами $l_{\perp} \sim 100$ м имеет место и при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации, когда отсутствуют эффекты резонансного взаимодействия с плазмой.

В разделе 1.3 на основе результатов проведённых экспериментов обсуждаются возможные механизмы генерации ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м. Установлено, что на их генерацию оказывают влияние резонансные эффекты взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой. Это проявляется в гирогармонических свойствах генерации таких ИИН и в их возбуждении вплоть до превышения частотой волны накачки значения f_{oF2} на 100 – 200 кГц. Такие эффекты не могут являться основным механизмом генерации ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м, так как, согласно результатам экспериментов по воздействию на ионосферу мощными радиоволнами с необыкновенной поляризацией, такие ИИН способны возбуждаться и в отсутствие резонансного взаимодействия с плазмой. В данном случае естественно предполагать влияние СФН. Однако, как известно, СФН приводит к развитию неоднородностей, поперечные размеры которых существенно превышают длину волны для ВН. Предполагается, что генерация ИИН с $l_{\perp} \sim 100$ м может происходить за счет нелинейной перекачки по спектру турбулентности со стороны максимума в области $l_{\perp} \approx 500$ м. При этом основным механизмом генерации можно считать СФН, а роль резонансных эффектов, которые проявляются при О-нагреве, сводится к её усилению. Необходимо отметить, что, несмотря на частое упоминание эффекта нелинейной перекачки по спектру турбулентности в литературе, на данный момент какой-либо полноценной теории, объясняющей и подтверждающей данный эффект в ионосферных экспериментах, автору диссертации не известно.

В разделе 1.4 представлено заключение по первой главе и сформулированы основные её результаты.

Во второй главе проведено изучение гирогармонических свойств генерации ИИН.

В разделе 2.1 проведено исследование спектральных характеристик сигналов ракурсного рассеяния на декаметровых неоднородностях. При регистрации сигналов ракурсного рассеяния для московской станции РВМ на

частотах 9996 кГц и 14996 кГц, а также для ряда вещательных станций в диапазоне 15 – 22 МГц, в приёмных пунктах, расположенных около г. Ростова-на-Дону и г. Харькове, обнаружено, что имеет место зависимость уширения спектра рассеянного сигнала от величины расстройки $\delta f = f_{\text{ВН}} - 4f_{\text{св}}$. При этом максимальное уширение спектра рассеянного сигнала наблюдается при его рассеянии в области «магнитного зенита» для ВН при $\delta f_{\text{max}} \approx 30 - 60$ кГц. Установлено, что в оптимальных условиях проведения измерений характерное время развития широкополосной компоненты спектра рассеянного сигнала отвечает времени роста искусственных декаметровых неоднородностей. Время релаксации широкополосной компоненты рассеяния составляет 0.4 – 0.9 с, что намного меньше времени релаксации декаметровых неоднородностей.

В разделе 2.2 приводятся результаты проведённых на стенде СУРА исследований, в которых было установлено, что при периодическом [10 с – излучение, 10 с – пауза] воздействии на ионосферу мощными радиоволнами О-поляризации с $P_{\text{эфф}} \approx 55$ МВт на частоте немного выше гармоники гирочастоты электронов, наблюдается появление вариаций ТЕС в пределах до 0.02 – 0.03 TECU, которые, согласно сделанным оценкам, могут отвечать генерации ИИН с $\Delta N/N \approx 2 - 3\%$. Установлено, что их генерация происходит наиболее эффективно в области «магнитного зенита» для ВН. Время релаксации этих неоднородностей составляет ≤ 1 с, что соответствует времени релаксации широкополосной компоненте сигналов ракурсного рассеяния на декаметровых искусственных неоднородностях ионосферной плазмы, возбуждаемых мощной радиоволной вблизи высоты её отражения в F_2 -слое вечерней или ночной ионосферы.

В разделе 2.3 на основе полученных результатов проводится сравнение таких параметров наблюдаемых эффектов, как времена развития, времена релаксации, условия, при которых наблюдается максимум. Показано, что эффекты уширения спектра рассеянного на декаметровых неоднородностях сигнала, быстрые флуктуации ТЕС, а также медленная Broad Upshifted Maximum (BUM) компонента искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) имеют схожие значения по перечисленным параметрам, а значит естественно полагать, что они имеют и одинаковую природу возникновения, что может быть объяснено в рамках высказанной в [28] гипотезы. Таким образом, полученные результаты могут являться ещё одним важным косвенным подтверждением обнаружения сверхмелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей.

В разделе 2.4 представлено заключение по второй главе и сформулированы основные её результаты.

Третья глава диссертации посвящена исследованию особенностей генерации ИИН различных масштабов при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами необыкновенной поляризации.

В разделе 3.1 рассматривается возможность генерации мелкомасштабных ИИН с $l_{\perp} \leq 20$ м при X-нагреве. В работах [33-37], посвященных экспериментам на стенде EISCAT-heating (Тромсё, Сев. Норвегия), описывается обнаруженная, вопреки имевшимся представлениям об ИИТ при X-нагреве, генерация сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля ИИН декаметровых масштабов. В экспериментах на стенде «Сура» диагностика этих неоднородностей выполнялась методом ракурсного рассеяния КВ радиоволн на приёмном пункте, развёрнутом около г. Ростов-на-Дону. В экспериментах на стенде «Сура», в отличие от аналогичных экспериментов в авроральной ионосфере на стенде EISCAT-heating, не наблюдалась генерация декаметровых ИИН с масштабами $l_{\perp} \approx 10 - 20$ м.

В разделе 3.2 приводятся результаты исследования ИИН с $l_{\perp} \sim 100$ м при воздействии мощных радиоволн X-поляризации на ионосферу, которые уже были подробно рассмотрены в разделе 1.2.

В разделе 3.3 рассматривается генерация ИИН с $l_{\perp} \approx 0.3 - 3$ км. Исследование таких ИИН осуществляется посредством вертикального зондирования ионосферы с помощью сигналов ионозонда, расположенного непосредственно на стенде «Сура». Такие измерения дают возможность контролировать уровень взаимодействия мощной радиоволны с плазмой по развитию F -рассеяния (по появлению F_{spread} на ионограммах). Выполненные исследования позволяют заключить, что ИИН с масштабами от нескольких сотен метров до нескольких километров хорошо возбуждаются в условиях вечерней и ночной ионосферы, интенсивность относительных флуктуаций плотности плазмы в них может достигать 10 – 20%, пороговая мощность их генерации составляет 20 – 30 МВт. В утренние часы измерений их интенсивность заметно слабее по сравнению с вечерними и ночными часами, а их возбуждение возможно только при высоких мощностях волны накачки $P_{\text{эфф}} \geq 100$ МВт. В условиях дневной ионосферы они регистрировались далеко не всегда и то только при $P_{\text{эфф}} \geq 100$ МВт.

В разделе 3.4 рассматривается генерация ИИН с $l_{\perp} \approx 3 - 100$ км. Исследования характеристик возмущений плотности плазмы этих масштабов удобно проводить с помощью зондирования возмущённой области сигналами спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Представленные в данном разделе результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что генерация ИИН с $l_{\perp} = 3 - 10$ км и более крупномасштабных неоднородностей на высотах вблизи максимума F_2 -слоя ионосферы на стенде «Сура» регистрировалась только в условиях вечерней и ночной ионосферы. При этом их интенсивность была на порядок меньше интенсивности таких неоднородностей при модификации ионосферы волнами O-поляризации. Кроме того, обнаружено, что в нескольких экспериментах наиболее интенсивные неоднородности регистрировались на краю диаграммы направленности в области $\sim 0.1 P_{\text{max}}$.

В разделе 3.5 делаются выводы об особенностях генерации ИИН различных масштабов при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами необыкновенной поляризации. Здесь также подробно рассматривается эффект генерации ИИН километровых масштабов на краю диаграммы направленности передающей антенны стенда. Предполагается, что эту особенность можно связывать с наиболее быстрым изменением интенсивности электрического поля мощной радиоволны в поперечном к оси пучка направлении и, следовательно, с неоднородным нагревом плазмы в этом направлении. Существенными являются как моменты включения, так и выключения мощной радиоволны, когда в ионосферной плазме процессы развития и релаксации искусственной ионосферной турбулентности протекают наиболее интенсивно, что приводит к возбуждению наиболее сильных токов по периметру возмущённой области.

В разделе 3.6 представлено заключение по третьей главе и сформулированы основные её результаты.

Четвёртая глава диссертации посвящена исследованию возбуждения ИИТ на высотах внешней ионосферы.

В разделе 4.1 проводится исследование искусственной ионосферной турбулентности на высотах внешней ионосферы с помощью бортовой аппаратуры низкоорбитальных спутников.

В разделе 4.1.1 представлены результаты измерений с помощью бортовой аппаратуры французского микро ИСЗ DEMETER (высота орбиты 660 км) и американских ИСЗ серии DMSP (высота орбиты 840 км). На основе сравнения результатов экспериментальных исследований ИИТ на высотах внешней ионосферы с помощью спутников DEMETER и DMSP подтверждено развитие дактов с повышенной плотностью плазмы (и, соответственно, перенос возмущения вдоль силовой трубки), как минимум, до высот ~ 840 км. При этом выявлена сильная суточная зависимость в эффективности формирования дактов с максимумом в условиях ночной ионосферы ($\delta N/N = 20-40\%$) и значительно более низкой ($\delta N/N = 1-10\%$) в утренние и дневные часы.

В разделе 4.1.2 представлены результаты измерений с помощью бортовой аппаратуры европейских спутников серии SWARM, с высотой орбит ~ 450 км и ~ 500 км, на которых имеет место переход от области с интенсивной генерацией ИИТ вблизи высоты отражения волны накачки к области переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу и формирования дактов с повышенной концентрацией плазмы. В данном разделе для демонстрации свойств наблюдаемых возмущений плотности и температуры плазмы и большой изменчивости их характеристик подробно

рассмотрены четыре сеанса нагрева ионосферы мощными КВ радиоволнами. По результатам всех выполненных сеансов нагрева сделан вывод, что на высотах 450 – 500 км не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы с размерами ~ 100 км поперёк линий геомагнитного поля, которые регистрировались на высотах ~ 660 км. Также было установлено, что на этих высотах наблюдаются более сильные вариации T_e и увеличение среднего T_e по сравнению с высотами ~ 660 км.

В разделе 4.2, в дополнение к рассмотрению выполненных с помощью ИСЗ измерений вариаций плотности и температуры электронов плазмы в возмущённой магнитной силовой трубке, анализируются результаты эксперимента по изучению пространственной структуры ВО ионосферы, представленного в работе [38], где высотное распределение вариаций плотности плазмы строится по данным радиотомографических измерений.

В разделе 4.3 представлено заключение по четвертой главе и сформулированы основные её результаты.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Изучены особенности генерации ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м. Установлено, что на их генерацию оказывают влияние резонансные эффекты взаимодействия мощной радиоволны О-поляризации с плазмой. Это проявляется в гирогармонических свойствах генерации таких ИИН и в их возбуждении вплоть до превышения частотой волны накачки значения f_{OF2} на 100 – 200 кГц. Из этого следует, что при их генерации играют роль высокочастотные верхнегибридные плазменные волны. С другой стороны, генерация ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м возможна и в отсутствие резонансных эффектов, о чём свидетельствуют результаты экспериментов по воздействию на ионосферу мощными радиоволнами с необыкновенной поляризацией. На основании полученных результатов можно предположить, что генерация ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м может происходить за счёт нелинейной перекачки по спектру турбулентности со стороны спектрального максимума ИИН в области $l_{\perp} \approx 500$ м, генерация которого происходит при развитии СФН, а роль резонансных эффектов, которые имеют место при О-нагреве, сводится к дополнительному усилению СФН. При этом необходимо отметить, что, несмотря на частое упоминание эффекта нелинейной перекачки по спектру турбулентности в литературе, на данный момент какой-либо полноценной теории, объясняющей и подтверждающей данный

эффект в условиях ионосферных экспериментов, автору диссертации не известно.

2. Проведено экспериментальное исследование гирогармонических свойств генерации ИИН. Установлено, что:
 - а. Имеет место зависимость уширения спектра рассеянного на декаметровых ИИН сигнала от величины расстройки частоты ВН от гармоники гирочастоты электрона $\delta f = f_{ВН} - 4f_{ce}$. Максимальное уширение спектра рассеянного сигнала, как и максимум медленной ВУМ компоненты ИРИ, наблюдается в области «магнитного зенита» для ВН при $\delta f_{max} \approx 30 - 60$ кГц. Экспериментально показано, что в этих же условиях наблюдается появление вариаций величины ТЕС в пределах до $0.02 - 0.03$ TECU при просвечивании ВО ионосферы сигналами навигационных спутников системы GPS. Установлено, что в оптимальных условиях проведения измерений характерное время развития широкополосной компоненты спектра рассеянного сигнала отвечает времени роста искусственных декаметровых неоднородностей, при этом время релаксации широкополосной компоненты рассеяния составляет ≤ 1 с, которое оказывается намного меньше времени релаксации декаметровых неоднородностей.
 - б. Эффекты уширения спектра рассеянного на декаметровых неоднородностях сигнала и появление быстро релаксирующих после выключения ВН флуктуаций ТЕС, а также схожесть некоторых их параметров (время развития и релаксации, условия, при которых наблюдается максимум) с параметрами медленной ВУМ компоненты ИРИ, могут быть объяснены в рамках высказанной в [28] гипотезы о генерации сверхмелкомасштабных неоднородностей и тем самым служить её косвенным подтверждением.
3. Установлено, что спектр ИИН при модификации среднеширотной ионосферы волнами Х-поляризации обрывается для неоднородностей с $l_{\perp} < 50$ м, по сравнению со случаем О-нагрева его спектральная интенсивность в несколько раз слабее в области масштабов 50 м – 3 км и имеет, по крайней мере, на порядок более слабую спектральную интенсивность в области масштабов $l_{\perp} \geq 5$ км.
4. На основе сравнения результатов экспериментальных исследований ИИТ на высотах внешней ионосферы с помощью спутников DEMETER и DMSP подтверждено развитие дактов с повышенной плотностью плазмы, как минимум, до высот ~ 840 км. При этом выявлена сильная суточная зависимость в эффективности

формирования дактов с максимумом в условиях ночной ионосферы ($\delta N/N = 20-40\%$) и значительно более низкой ($\delta N/N = 1-10\%$) в утренние и дневные часы.

5. С помощью ИСЗ SWARM выполнены исследования свойств плазменных возмущений в области высот 450 – 500 км, на которых происходит переход от области ионосферы вблизи высоты отражения волны накачки, где происходит интенсивная генерация ИИТ и формирование полости с пониженной концентрацией плазмы, к области высот внешней ионосферы, где регистрируется формирование дактов с повышенной концентрацией плазмы внутри возмущённой магнитной силовой трубки. На высотах 450 – 500 км не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы с размерами ~ 100 км поперёк линий геомагнитного поля, которые регистрировались на высотах ~ 660 км. Было установлено, что во время работы станда «Сура» на этих высотах наблюдается увеличение среднего значения температуры электронов и более сильные её вариации по сравнению с высотами ~ 660 км.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Болотин, И.А. Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей с использованием коротких радиотрасс зондирования / И.А. Болотин, В.Л. Фролов, А.Д. Акчурин, Е.Ю. Зыков, К.М. Юсупов // Известия вузов. Радиофизика. – 2012. – Т.55, №1-2. – С. 66-78.
- A2. Фролов, В.Л. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей. / В.Л. Фролов, И.А. Болотин, Г.П. Комраков, Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, Е.Г. Вертоградова, А.Д. Акчурин, В.В. Бочкарев, А.М. Дрешер, Е.Ю. Зыков, Р.Р. Латыпов, И.Р. Петрова, К.М. Юсупов, В.Е. Куницын, А.М. Падохин, Г.А. Курбатов. // Известия вузов. Радиофизика. – 2012. – Т.55, №06. – С. 393-420.
- A3. Бахметьева, Н.В. О формировании искусственных плазменных возмущений в нижней ионосфере. / Н.В. Бахметьева, В.Л. Фролов, В.Д. Вяхирев, Е.Е. Калинина, И.А. Болотин, А.Д. Акчурин, Е.Ю. Зыков // Известия вузов. Радиофизика. – 2012. – Т.55, №1-2. – С. 106-121.
- A4. Фролов, В.Л. Генерация искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на среднеширотную ионосферу Земли мощными КВ радиоволнами с необыкновенной поляризацией. / В.Л. Фролов, И.А. Болотин, Г.П. Комраков, Першин А.В., Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, Е.Г. Вертоградова, В.Е. Куницын, А.М. Падохин, Г.А. Курбатов, А.Д. Акчурин, Е.Ю. Зыков. // Известия вузов. Радиофизика. – 2014. – Т.57, №6. – С. 437-463.
- A5. Болотин, И.А. Об особенностях механизма генерации искусственных ионосферных неоднородностей в области масштабов $l_{\perp} \approx 50 - 200$ м. / И.А. Болотин, В.Л. Фролов, А.Д. Акчурин, Е.Ю. Зыков // Известия вузов. Радиофизика. – 2016. – Т.59 №12, – С. 1087-1097.
- A6. Фролов, В.Л. Генерация сверхмелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами. / В.Л. Фролов, И.А. Болотин, Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов // Известия вузов. Радиофизика. – 2017. – Т.60 №6, – С. 502-508.
- A7. Фролов, В.Л. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450–500 км при работе станда "Сура". / Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Белов А.С., Болотин И.А., Добровольский М.Н., Рябов А.О., Шорохова Е.А. // Известия вузов. Радиофизика. – 2018. – Т.61 №5, – С. 359-373.
- A8. Болотин, И.А. Влияние эффекта магнитного зенита на генерацию сверхмелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. / И.А. Болотин, В.Л. Фролов, Г.Г. Вертоградов, В.Г.

Вертоградов // Известия вузов. Физика. – 2016. – Т.59 №12-3, – С. 15-18.

- A9. Фролов, В.Л. GPS-диагностика крупномасштабных возмущений плотности плазмы, возбуждаемых во внешней ионосфере Земли при модификации F₂-области ионосферы мощными КВ радиоволнами. / В.Л. Фролов, И.А. Болотин, Г.П. Комраков, Я.В. Глухов, Е.С. Андреева, В.Е. Куницын, Г.А. Курбатов. // Гелиогеофизические исследования. – 2015. – Вып. 13. – С. 49-61.
- A10. Куницын, В.Е. Диагностика эффектов нагрева ночной среднеширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами О- и Х-поляризации по данным приема сигналов GPS. / В.Е. Куницын, А.М. Падохин, И.А. Болотин, В.Л. Фролов // Международная научно-практическая студенческая конференция. 29-30 ноября 2012. Сборник докладов. – Казань, Зеленодольск, 2012. – С. 30-33
- A11. Акчурин, А.Д. Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей на коротких радиотрассах. / Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Юсупов К.М., Болотин И.А., Фролов В.Л. // XXIII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Труды конференции. – Т. 2. – С. 185–188.
- A12. Куницын, В.Е. Свойства вариаций полного электронного содержания в ионосфере, возмущенной излучением нагревного стенда «Сура». / Куницын В.Е., Падохин А.М., Васильев А.Е., Курбатов Г.А., Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. // XXIII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Труды конференции, – Т. 2. – С. 247–250.
- A13. Фролов, В.Л. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей. / Фролов В.Л., Болотин И.А., Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. Вертоградова Е.Г., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Юсупов К.М. // XXIII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Труды конференции, – Т. 2. – С. 285–288.
- A14. Фролов, В.Л. Пространственная структура возмущенной области ионосферы (по результатам её зондирования сигналами GPS). / В.Л. Фролов, И.А. Болотин, Г.П. Комраков, В.Е. Куницын, А.М. Падохин А.Е. Васильев, Г.А. Курбатов. // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (ИРЭМВ 2011), Таганрог - Дивноморское, 27 июня - 2 июля 2011г. – С. 444-448.
- A15. Болотин, И.А. Особенности возбуждения искусственной турбулентности в ионосфере при воздействии на неё мощной радиоволной Х-поляризации. / Болотин И.А., Фролов В.Л. // Труды XVI научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2012. – С. 74-76

- A16. Bolotin, I. A. Diagnostics of the artificial ionosphere irregularities with $h'_{p} \approx 50 - 200$ m. / I. A. Bolotin, V. L. Frolov, A. D. Akchurin, E. Yu. Zykov, K. M. Yusupov. // AIS-2012, June 24-30, 2012, Kaliningrad. – P. 64-65
- A17. Kunitsyn, V.E. Radiotomographic studies of wavelike disturbances in ionosphere disturbed by powerful HF-heating / V.E. Kunitsyn, E.S. Andreeva, A.M. Padokhin, M.A. Annenkov, V. L. Frolov, G.P. Komrakov, I. A. Bolotin. // AIS-2012, June 24-30, 2012, Kaliningrad. – P. 67-69
- A18. Болотин, И.А. Generation of the Super Small Scale Artificial Ionospheric Irregularities and its dependence on the Magnetic Zenith Effect / Болотин И.А., Фролов В.Л., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. // AIS-2016, June 19-24, 2016, Kaliningrad. – P. 203-206.
- A19. Болотин, И.А. О механизме генерации искусственных ионосферных неоднородностей с масштабами 50 – 200 м. / И.А. Болотин, В.Л. Фролов, А.Д. Акчурин, Е.Ю. Зыков // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн». Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014. Сб-к докладов. – Т. 3. – С. 41-43.
- A20. Болотин, И.А. Результаты экспериментов по регистрации сверхмелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей с помощью сигналов GPS. / И.А. Болотин, В.Л. Фролов, А.М. Падохин, В.Е. Куницын. // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн». Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014. Сб-к докладов. – Т. 3. – С. 41-46.
- A21. Фролов, В.Л. Генерация искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на среднеширотную ионосферу Земли мощными КВ радиоволнами Х-поляризации. / В.Л. Фролов, И.А. Болотин, Г.П. Комраков, А.В. Першин, Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, Е.Г. Вертоградова, В.Е. Куницын, А.М. Падохин, Г.А. Курбатов, А.Д. Акчурин, Е.Ю. Зыков. // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн». Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014. Сб-к докладов. – Т. 3. – С. 108-111.
- A22. Фролов, В.Л. Характеристики искусственных дактов плотности плазмы, возбуждаемых во внешней ионосфере мощным радиоизлучением стенда «СУРА». / В.Л. Фролов, И.А. Болотин, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова, Ж.-Л. Рош, М. Парро, Е.В. Мишин. // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн». Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014. Сб-к докладов. – Т. 3. – С. 116-119.
- A23. Болотин, И.А. Влияние эффекта магнитного зенита на генерацию сверхмелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей. / Болотин И.А., Фролов В.Л., Вертоградов Г.Г.,

Вертоградов В.Г. // Труды XXV Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн. Томск, 2016. Сб-к трудов. – Т. 1. – С. 66.

- A24. Bolotin, I. A. Characteristics of artificial plasma disturbances at heights about 500 km. / I. A. Bolotin, A. O. Ryabov, V. L. Frolov, R. Yu. Lukyanova, M. N. Dobrovolsky. // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 26-30 June 2017, Divnomorskoe, Russia. – DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103587

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bailey, V. A., The influence of electric waves on the ionosphere / Bailey V.A., Martyn D.F. // *Phil. Mag.* 1934. – Vol.18. – pp. 369-386.
2. Sciacchitano A. Phenomenon of the interaction of radio waves; the Luxemburg effect. // *Scientia*, 1956. Vol. 91. P. 206.
3. Виленский, И.М., Нелинейные явления при распространении радиоволн в ионосфере / Виленский И.М., Зыкова Н.А. // *Известие вузов. Радиофизика.* – 1959. – Т.2. – С. 543.
4. Гинзбург В. Л., К теории люксембург-горьковского аффекта. // *Изв. АН СССР, Серия физ.* – 1948. – Т.12, № 3. – С. 293—309.
5. Ratcliffe, J. A., A Study of the Interaction of Radio Waves / Ratcliffe J. A., Shaw I. J. // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A.* – Vol. 193, No.1034 (Jul. 2, 1948). – pp. 311-343
6. Huxley, L.G.H., Measurements of the Interaction of Radio Waves in the Ionosphere / Huxley L.G.H., Foster H.G., Newton C.C. // *Proc. Phys. Soc.* 1948. – Vol.61, №2. – pp.134-146
7. Hibberd, F.H., On the observation of ionospheric self-interaction. // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1956. – Vol.8, No.2. – P.120-122.
8. Гуревич, А.В., К вопросу о распространении сильных электромагнитных волн в плазме. // *Радиотехника и электроника*, 1956. – Т.1, № 6. – С. 704-719.
9. Гинзбург, В.Л., Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле / Гинзбург В.Л., Гуревич А.В // *УФН*, 1960. – Т. 70. – С. 201-246.
10. Гуревич, А.В., Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере / Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. // М.: Наука, 1973. – 272 с.
11. Gurevich A.V., Nonlinear phenomena in the ionosphere. // *New York: Springer*, 1978. – 372 p.
12. Фролов, В.Л., Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. // *Монография. Изд. ННГУ*, 2017. – 468 с
13. *Изв. вузов. Радиофизика.* 1999. – Т. 42, № 7-8 (спец. выпуск).
14. *Изв. вузов. Радиофизика.* 2005. – Т. 48, № 9 (спец. выпуск).
15. *Изв. вузов. Радиофизика.* 2008. – Т. 51, № 11 (спец. выпуск).
16. *Изв. вузов. Радиофизика.* 2012. – Т. 55, № 1-2 (спец. выпуск).
17. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1982. – Vol. 44, No. 12 (special issue).
18. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1985. – Vol. 47, No. 12 (special issue).
19. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1997. – Vol. 59, No. 18 (special issue).
20. *J. Geophys. Res.* 1970. – Vol. 75, No. 31 (special issue).
21. Беликович, В.В., Стенд "Сура": исследование атмосферы и космического пространства (обзор) / Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В. // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2007. – Т. 50, № 7. – С. 545-576.

22. Гуревич, А.В., Нелинейные явления в ионосфере. // УФН, 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145-1177.
23. Ерухимов, Л.М., Искусственная ионосферная турбулентность (обзор). / Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. – Т. 30, № 2. – С. 208-225.
24. Фролов, В.Л., Модификация ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением. / В.Л. Фролов, Н.В. Бахметьева, В.В. Беликович, Г.Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, Г. П. Комраков, Д.С. Котик, Н.А. Митяков, С.В. Поляков, В.О. Рапопорт, Е.Н. Сергеев, Е.Д. Терещенко, А.В. Толмачева, В.П. Урядов, Б.З. Худукон // УФН, 2007. – Т. 177. № 3. – С. 330-340.
25. Ютло, У., Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн. / Ютло У., Коэн Р. // УФН, 1973. – Т. 109, № 2. – С. 371-373.
26. Streltsov, A.V. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space / A. V. Streltsov, J.-J. Berthelier, A. A. Chernyshov, V. L. Frolov, F. Honary, M. J. Kosch, R. P. McCoy, E. V. Mishin, M. T. Rietveld // Space Science Rev., 2018, DOI: 10.1007/s11214-018-0549-7
27. Gurevich, A.V., Modern problems of ionospheric modification. // Radiophys. and Quant. Electr., 1999. – Vol. 42, No. 7. – P.525-532.
28. Gurevich, A.V., Strong field aligned scattering of UHF radio waves in ionospheric modification. / Gurevich A.V., Zybin K.P. // Phys. Lett. A. 358 (2006). – P. 159-165.
29. Рапопорт, В.О., Некоторые результаты измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА. / Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Марков Г.А., Белов А.С., Парро М., Рош Ж.Л. // Изв. вузов. Радиофизика, 2007. – Т. 50, № 8. – С. 709-721.
30. Фролов, В.Л., Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением. / Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Парро М., Мишин Е.В // Письма в ЖЭТФ, 2008. – Т. 88, №.12. – С. 908-913.
31. Фролов, В.Л., Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА. / Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Парро М., Рош Ж.Л., Мишин Е.В. // Изв. вузов. Радиофизика, 2008. – Т. 51, № 11. – С. 915-934.
32. Helliwell, R.A., Whistlers and related ionospheric phenomena. // Stanford, California. Stanford Univ. Press, 1965. – 349 p.
33. Благовещенская, Н.Ф., Эффекты модификации высокоширотной ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением. 1. результаты комплексных наземных наблюдений / Благовещенская

- Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т.К., Ритвелд М.Т. // Изв. вузов. Радиофизика, 2010. – Т. 53, № 9-10, – С. 571-593.
34. Blagovethshenskaya, N.F., Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave / Blagovethshenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Rietveld M. T., Ivanova I. M., Baddeley L. J.. // Geophys. Res. Lett., 2011. . – Vol. 38, L08802, doi:10.1029/2011GL046724.
35. Blagovethshenskaya, N.F., Plasma modifications induced by an X-mode HF heater wave in the high-latitude F region of the ionosphere. // Blagovethshenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Rietveld M.T., Häggström I., Ivanova I.M.. // J. Atmos. Sol.-Terr. Ph., 2013. – Vol. 105-106. – pp. 231-244.
36. Wang, X., A theoretical investigation on the parametric instability excited by X-mode polarized electromagnetic wave at Tromsø / X. Wang, P. Cannon, C. Zhou, F. Honary, B. Ni, and Z. Zhao // J. Geophys. Res. Space Physics, – Vol.121, – pp.3578–3591, doi:10.1002/2016JA022411.
37. Wang, X., Parametric instability induced by X-mode wave heating at EISCAT / Wang, X., C. Zhou, M. Liu, F. Honary, B. Ni, Z. Zhao// J. Geophys. Res. Space Physics, – Vol.121, No.10, – pp. 10536-10548. DOI: 10.1002/2016JA023070
38. Kunitsyn, V.E., Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions / Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., Komrakov G.P., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. // Radio Sci. 2012. – Vol. 47, No. 4., CiteID RS0L15

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОБЛАСТИ МАСШТАБОВ $l_{\perp} \sim 100$ М

- 1.1. Методика диагностики ИИН в области масштабов $l_{\perp} \sim 100$ м
- 1.2. Свойства ИИН $l_{\perp} \sim 100$ м
 - 1.2.1. Гирогармонические свойства ИИН $l_{\perp} \sim 100$ м
 - 1.2.2. Нагрев на просвет
 - 1.2.3. Модификация ионосферной плазмы волнами с необыкновенной поляризацией
- 1.3. Выводы. Модель генерации ИИН с $l_{\perp} \sim 100$ м
- 1.4. Заключение по первой главе

ГЛАВА 2. ГИРОГАРМОНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕНЕРАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

- 2.1. Спектральные характеристики сигналов ракурсного рассеяния на декаметровых неоднородностях
- 2.2. Зондирование ВО ионосферы сигналами навигационных спутников системы GPS
- 2.3. Обсуждение полученных результатов
- 2.4. Заключение по второй главе

ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СРЕДНЕШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ Х-ПОЛЯРИЗАЦИИ

- 3.1. Генерация мелкомасштабных ИИН с $l_{\perp} \leq 20$ м
- 3.2. Генерация ИИН с $l_{\perp} \sim 100$ м
- 3.3. Генерация ИИН с $l_{\perp} \approx 0.3 - 3$ км
- 3.4. Генерация ИИН с $l_{\perp} \approx 3 - 100$ км
- 3.5. Выводы и заключительные замечания
- 3.6. Заключение по третьей главе

ГЛАВА 4. ВОЗБУЖДЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ВЫСОТАХ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

- 4.1. Исследование искусственной ионосферной турбулентности на высотах внешней ионосферы с помощью бортовой аппаратуры низкоорбитальных спутников
 - 4.1.1. Результаты измерений с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ DEMETER и DMSP
 - 4.1.2. Результаты измерений с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ SWARM
- 4.2. Высотное распределение вариаций плотности плазмы по данным радиотомографических измерений
- 4.3. Заключение по четвертой главе

Заключение

Список публикаций по теме диссертации

Список используемых источников