

На правах рукописи

КОТОВ Павел Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ И
ЭФФЕКТА СТРИКЦИОННОГО САМОВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ НАКАЧКИ**

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 – 2011

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник С.М. Грач

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Г.А. Марков
кандидат физико-математических наук
М.В. Стародубцев

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова
(г. Троицк)

Защита состоится « ____ » _____ 2011 г. в _____ на
заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском
государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу:
Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. ____, ауд. ____ .

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.ф.-м.н., доцент

Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы.

Околоземная плазма, в частности ионосфера, представляет собой удобный объект для изучения турбулентности магнитоактивной плазмы, как в естественных условиях, так и при различных искусственных воздействиях (излучение радиоволн с Земли и космических аппаратов, инжекция пучков заряженных частиц и различных химических реагентов). Систематические исследования процессов нелинейного взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с ионосферной плазмой начали проводиться с 70-х гг. в СССР и США. В настоящее время экспериментальные исследования искусственной турбулентности ионосферы, возникающей в поле мощных КВ радиоволн, проводятся на нагревных стендах (радиокомплексах) «Сура» (ФГНУ НИРФИ, Россия), EISCAT (Тромсе, Норвегия), HAARP и HIPAS (Аляска, США), SPEAR на о. Шпицберген. Диагностика возмущенной области ионосферы осуществляется различными радиофизическими методами: с помощью ее зондирования и просвечивания радиоволнами КВ, УКВ и СВЧ диапазонов (пробные волны, ракурсное рассеяние, резонансное рассеяние, радары когерентного и некогерентного рассеяния), а также при измерениях излучения из возмущенной области в оптическом и радио диапазонах; ряд исследований был проведен при запусках геофизических ракет через возмущенную область. В экспериментах изучаются различные искусственные возмущения F-области ионосферы: структура пространственного и частотного спектра квазипотенциальных волн; пространственные спектры и динамика искусственных неоднородностей электронной концентрации различных масштабов; дополнительная ионизация и оптическое свечение, вызываемые электронами, ускоренными плазменными волнами; искусственное радиоизлучение ионосферы; проникновение искусственной турбулентности плазмы во внешнюю ионосферу и др. Теоретический анализ полученных данных позволяет развивать современные представления о физике плазмы, находящейся в высокочастотном электрическом поле, инициировал развитие теории тепловых параметрических явлений в столкновительной магнитоактивной плазме. Активно исследуются возможности и эффективность захвата верхнегибридных волн в мелкомасштабные неоднородности, вытянутые вдоль геомагнитного поля, различные режимы ускорения электронов ленгмюровскими и верхнегибридными волнами и т. д. Актуальность проблемы исследований определяется необходимостью более глубокого понимания природы естественных и антропогенных возмущений параметров околоземной среды, их влияния на работу телекоммуникационных систем наземного и космического базирования, а также поисками возможностей контроля системы «ионосфера-магнитосфера».

Необходимость изучения закономерностей поведения плазменной турбулентности в реальных средах ставит серьезные задачи получения из эксперимента как можно более полной информации о процессах, протекающих в магнитоактивной неоднородной плазме. В последнее время с быстрым развитием цифровой техники значительно выросли возможности получения информации об окружающей среде с помощью радиофизических методов. В диссертации с помощью комбинации традиционных (вертикальное зондирование ионосферы, измерение стационарных спектров принимаемого излучения с помощью последовательного приема в исследуемой полосе частот) и современных (регистрация сигналов в широкой полосе частот с высоким временным разрешением с помощью быстродействующих АЦП с высоким динамическим диапазоном и их последующим спектральным анализом) методов удалось получить существенно новую информацию о поведении ионосферной плазмы в поле мощных радиоволн и заметно продвинуться в понимании физической картины происходящих явлений. Это и определило актуальность темы диссертационной работы.

Цель работы.

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное исследование характеристик искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) при различных условиях ее возбуждения с помощью анализа самовоздействия мощной радиоволны (волны накачки, ВН) и свойств искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ).

Это, во-первых, исследования свойств ИИТ на начальной стадии ее развития (стадии стрикционной параметрической неустойчивости, (СПН)) в зависимости от частоты ВН f_0 , ее мощности P_0 и времени суток. Во-вторых, анализ свойств ИРИ на стационарной стадии воздействия (стадии тепловой параметрической неустойчивости, ТПН) во всем диапазоне рабочих частот стенда «Сура» $4.3 < f_0 < 9.5$ МГц. В-третьих, это детальное исследование поведения спектров ИРИ в зависимости от частоты воздействия f_0 вблизи электронных гирогармоник, $f_0 \sim n f_c$. В соответствии с геофизическими условиями эти исследования проводились при $n=4,5$. В четвертых, это анализ конкуренции ленгмюровской турбулентности, возникающей в результате развития СПН, и верхнегибридной турбулентности, возникающей в результате развития ТПН, при переходе от непрерывного режима нагрева ионосферы мощным КВ радиоизлучением к импульсному режиму с малой скважностью.

Методы исследования.

Исследования искусственной турбулентности ионосферной плазмы проводились в ФГНУ НИРФИ на специализированном стенде «Сура», расположенном в 140 км к востоку от Нижнего Новгорода в р/п Васильсурск (географические координаты 56.1° с.ш. и 46.1° в.д.). Приемо-передающий комплекс стенда оснащен тремя независимыми передающими секциями с общей эффективной мощностью излучения 150 - 300 МВт и автоматизированной системой управления. Диапазон рабочих частот стенда «Сура» составляет

4.3 - 9.5 МГц, мощность передатчиков $P=250 \text{ кВт} \times 3 = 750 \text{ кВт}$, коэффициент усиления антенной системы стенда составляет $G = 200\text{--}380$. Стенд «Сура» оснащен цифровым ионозондом «Базис», регистраторами искусственного радиоизлучения ионосферы. Для регистрации ИРИ и отраженного от ионосферы сигнала волны накачки использовались программируемый спектраллизатор НР3585А, несколько профессиональных КВ приемников «Катран», многофункциональные платы АЦП АТ-МЮ16-Е2 и L1450-32, персональные компьютеры типа «Pentium» и оригинальное программное обеспечение, созданное на основе языка графического программирования «LabVIEW»; многофункциональное трехканальное КВ радиоприемное устройство (РПУ) с диапазоном частот 1-30 МГц и динамическим диапазоном 90 дБ, сопряженное с системой цифровой обработки сигнала промежуточной частоты 2500 кГц в полосе до 500 кГц, позволяющее проводить регистрацию, фильтрацию и спектральную обработку радиосигналов в реальном времени.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных исследований характеристик эффекта стрикционного самовоздействия ВН и динамики ИРИ на начальной стадии воздействия ВН на ионосферу, а также сопоставление данных эксперимента с существующими теоретическими представлениями о стрикционной параметрической неустойчивости в ионосферной плазме.

2. Результаты анализа поведения стационарных спектров ИРИ в зависимости от частоты накачки во всем диапазоне рабочих частот стенда «Сура».

3. Результаты экспериментальных исследований зависимости стационарных спектров ИРИ от частоты волны накачки в узких областях частот вблизи 4-й и 5-й гармоник электронной циклотронной частоты, выводы о свойствах ИРИ и ИИТ при таких частотах волны накачки.

4. Результаты анализа экспериментальных исследований динамики ИРИ на стадии перехода режима излучения волны накачки из непрерывного в импульсный с большой скважностью.

Научная новизна.

1. На основе экспериментальных исследований эффекта ССВ и теоретических представлений об СПН определены пороговые поля и инкременты СПН в ионосфере в зависимости от частоты ВН и высоты её отражения, а также времени суток.

2. Детально изучены морфологические характеристики (форма спектра, интенсивность) ИРИ во всем диапазоне частот стенда «Сура» при стационарном (длительном) воздействии на ионосферу.

3. По оригинально разработанной методике детально исследованы основные характеристики различных спектральных компонент ИРИ в узких областях частот ВН вблизи 4-й и 5-й электронных гирогармоник; сделаны выводы о физических механизмах генерации различных компонент ИРИ,

уточнен метод определения электронной циклотронной частоты и плотности плазмы в области взаимодействия мощной радиоволны с ионосферой.

4. Исследован процесс конкуренции различных механизмов возбуждения турбулентности на стадии релаксации искусственных мелкомасштабных неоднородностей.

Практическая значимость работы.

Результаты работы являются основой для развития новых методов дистанционной диагностики искусственных и естественных ионосферных возмущений, построения наиболее полной физической картины явлений, происходящих при взаимодействии мощных высокочастотных электромагнитных волн в магнитоактивной плазме, в частности, КВ радиоволн с ионосферой Земли. Методика проведения экспериментов планируется к использованию при проведении исследований на стенде HAARP. Полученные результаты представляют несомненный интерес для сообщества исследователей, ведущих работы на нагревных стендах «Сура», EISCAT, HAARP, Arecibo, а также для следующих организаций и учреждений РФ: ФИАН им. П.Н. Лебедева, ФГНУ НИРФИ, ИПФ РАН, ИКИ РАН, ИЗМИРАН, КПФУ, МарГТУ, ААНИИ, СибИЗМИР.

Апробация результатов работы.

Результаты работы неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и симпозиумах. Были сделаны доклады на:

- (Седьмой) Научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию со дня рождения В.С.Троицкого, Нижний Новгород, 7 мая 2003 г.;
- (Восьмой) научной конференции по радиофизике, посвященной 80-летию со дня рождения Б.Н.Гершмана, Нижний Новгород, 7 мая 2004 г. и (Девятой) Научной конференции по радиофизике «Факультет – ровесник Победы», Нижний Новгород, 7 мая 2005 г.

- VI-ой и VII-ой Международных Суздальских симпозиумах URSI. Москва, 2004, 2007 г.

- 35-ой научной ассамблее COSPAR, Париж, Франция 2004 и 36-ой научной ассамблее COSPAR Пекин, Китай 2006,

- XXI Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 2005,

- 8-ой и 9-ой Нижегородской сессии молодых учёных, 2003, 2004 г.

По результатам исследований, составивших основу диссертации, опубликовано 31 научная работа, включая 6 статей в реферируемых журналах.

Работы, результаты которых вошли в диссертацию, были поддержаны проектами РФФИ и INTAS.

Личный вклад автора.

Диссертант принимал непосредственное участие в обсуждении постановки задачи, экспериментальных работах на стенде «Сура», обработке и анализе полученных данных, обсуждении и физической интерпретации результатов. В процессе анализа полученных данных им, в частности, были обнаружены эффект асимметрии в поведении спектров ИРИ при $f_0 < nf_{ce}$ и $f_0 > nf_{ce}$ для наклонного воздействия и восстановление «ленгмюровских» компонент ИРИ при переводе режима излучения волны накачки от непрерывного к импульсному; установлено значение частот ВН и компонент ИРИ вблизи электронных giroгармоник, при которых имеет место максимальное подавление ИРИ.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения четырёх глав и заключения. Общий объём работы – 113, включая 109 страниц основного текста, включая 30 рисунков, а также список литературы из 106 наименований

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В первой вводной главе дан краткий обзор существующих к настоящему времени представлений о процессах, протекающих в ионосфере под действием мощных радиоволн и приводящих к возбуждению ИИТ, а также современного состояния исследований, проводится постановка проблемы, решаемой в диссертации. Приводятся сведения о начальной стадии воздействия, на которой основную роль играет стрикционная параметрическая неустойчивость (СПН); описание промежуточной стадии воздействия – генерация «пичков» в спектре отраженного сигнала ВН, – а также генерации верхнегибридной турбулентности и мелкомасштабных неоднородностей, вытянутых вдоль геомагнитного поля, в результате развития тепловой параметрической неустойчивости (ТПН) при длительном (стационарном) воздействии. Приводятся основные сведения об искусственном радиоизлучении ионосферы (ИРИ), ускорении электронов плазменными волнами, оптическом свечении ионосферы. Приводится также описание приемно-передающей системы стенда «Сура».

Вторая глава посвящена результатам исследования характеристик развития нелинейных эффектов на начальной стадии взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с плазмой F-области ионосферы. Экспериментальные измерения были выполнены на нагревном стенде «Сура» в широком диапазоне частот волны накачки (4.5 – 9.0 МГц) в различное время суток при различной длительности (0.3 – 100 мс) и мощности воздействующего излучения (1 – 30 МВт). Проведенные измерения позволили исследовать зависимость порогов возбуждения и амплитудно-временных характеристик эффекта

стрикционного самовоздействия волны накачки, а также характеристик релаксации искусственного радиоизлучения ионосферы от параметров воздействия и ионосферных условий. Проведено сопоставление результатов измерений и характеристик развития стрикционной параметрической неустойчивости в ионосферной плазме.

В разделе 2.1 приведены основы теории стрикционной параметрической неустойчивости. Стрикционная параметрическая неустойчивость (СПН) является наиболее быстрым процессом, возникающим вблизи точки отражения мощного радиоизлучения обыкновенной поляризации в первые несколько миллисекунд после его включения. Она развивается вследствие стрикционного выдавливания плазмы из областей с повышенной интенсивностью электрического поля под действием стрикционной силы (силы Миллера).

В ионосфере в результате развития СПН вблизи уровня отражения волны накачки, где $f_{pe}^2 = f_0^2$ возбуждаются плазменные волны с частотами ниже ВН, волновыми векторами $\mathbf{k}_1 \parallel \mathbf{H}_0$, и длиной волны порядка нескольких десятков сантиметров, а также низкочастотные возмущения типа ионно-звуковых колебаний с частотой порядка нескольких кГц. Поскольку в изотермической плазме (где $T_e \sim T_i$, $T_{e,i}$ – температура электронов и ионов, соответственно) ионный звук сильно затухает, то в ионосфере имеет место не столько распадный процесс электромагнитной волны t в плазменную l и ионно-звуковую s ($t \rightarrow l + s$), сколько индуцированное рассеяние волны накачки в ленгмюровские волны на тепловых ионах.

В неоднородной ионосфере существенным становится разбухание поля вблизи точки отражения ВН, и при увеличении мощности ВН порог СПН достигается сначала в первых максимумах функции Эйри вблизи точки отражения. На эксперименте СПН проявляется, в первую очередь, в виде эффекта стрикционного самовоздействия ВН (ССВ ВН) – как быстрое (за несколько миллисекунд) уменьшение амплитуды отраженного от ионосферы сигнала ВН, – и сопровождается значительным увеличением интенсивности плазменных шумов вблизи уровня отражения мощного радиоизлучения.

Раздел 2.2 описывает методику проведения эксперимента и обработки данных. В мае 2001 г. на нагревном стенде «Сура» были проведены детальные экспериментальные исследования характеристик эффекта ССВ ВН в широком диапазоне частот $f_{gh} \approx 4.5 - 9$ МГц в дневное и вечернее время суток (14 ч – 21 ч мск.), когда мощное радиоизлучение отражалось на высотах F – слоя ионосферы ($h = 180 - 320$ км). Высотные профили плотности ионосферной плазмы определялось с помощью ионограмм, которые снимались в автоматическом 15 минутном режиме с помощью импульсной ионосферной станции «Базис». Максимальная мощность излучения передатчика стенда составляла 200 кВт, что с учетом коэффициента усиления антенно-фидерной системы соответствовало максимальной эффективной мощности излучения $P_{эфф} \approx 15 - 30$ МВт для используемых частот ВН. Длительность импульсов воздействия на ионосферную плазму варьировалась в пределах $\tau_{и} = 20; 50$ и 100 мс с большим периодом повторения $T_{и} = 2$ с для исключения эффектов

возбуждения теплового расслоения плазмы, наблюдающихся при длительном нагреве либо большой ($> 1 - 2$ МВт) средней мощности ВН в результате развития ТПН. Приведено описание определения декремента затухания плазменных волн по измерениям ИРИ, определения пороговой мощности ВН и инкрементов развития СПН по данным измерения ССВ ВН. Приводится также методика расчёта пороговых полей СПН по данным измерений декрементов затухания плазменных волн и эффекта ССВ ВН, а также расчёта структуры электрического поля ВН в области отражения с учётом линейного поглощения и данных вертикального зондирования ионосферы.

Далее в разделе 2.3 приводятся экспериментальные результаты, полученные в результате исследования эффекта стрикционного самовоздействия. Показаны зависимости доли теряемой энергии ВН при развитии эффекта стрикционного самовоздействия от максимальной величины электрического поля. Приводятся расчетные значения пороговых полей эффекта ССВ ВН и декрементов затухания плазменных волн для различных сеансов измерений и зависимость E_{II} от $(\gamma_e f_0)$ для всего цикла наблюдений. Показана зависимость характерных времен развития эффекта ССВ ВН от величины надпороговости эффекта $\delta = E_{en}^2 / E_{II}^2$.

Раздел 2.4 посвящен обсуждению результатов. Полученные в измерениях зависимости порогового поля эффекта стрикционного самовоздействия (E_{II}), декрементов затухания ИРИ (γ_e) и амплитудно-временных характеристик развития эффекта стрикционного самовоздействия от мощности, частоты ВН и ионосферных условий позволяют провести их сопоставление с существующими теоретическими представлениями. Согласно теории СПН, интенсивность порогового поля возбуждения неустойчивости удовлетворяет зависимости вида $(E_{II})^2 \propto \nu N_e T_e / (f_0 F_m)$. Поскольку на уровне отражения ВН О-поляризации $N_e \propto f_0^2$, для амплитуды порогового поля окончательно имеем $E_{II} \propto (\nu f_0)^{1/2}$. Экспериментально наблюдаемая зависимость, полученная для полного цикла измерений, $E_{II} \propto (\gamma_e f_0)^{0,48 \pm 0,05}$ практически совпадает с теоретической.

В общем случае декремент затухания интенсивности плазменных волн определяется выражением $\nu \approx \nu_e + 2\gamma_L + 2\gamma_{\Phi\Omega} \approx \nu_e + 2\gamma_{\Phi\Omega}$. Здесь $\nu_e \approx \nu_{ei} + \nu_{en}$ частота соударений электронов с ионами и нейтральными частицами, $2\gamma_L + 2\gamma_{\Phi\Omega}$ – декременты затухания Ландау на тепловых электронах и фотоэлектронах для интенсивности плазменных волн. В данном случае под фотоэлектронами подразумевается весь спектр сверхтепловых электронов, в том числе и ускоряемых плазменной турбулентностью.

В разделе 2.5 обсуждаются результаты и даются выводы проведенных исследований характеристик эффекта стрикционного самовоздействия ВН и динамики ИРИ которые позволили изучить зависимость пороговых полей возбуждения СПН и декрементов затухания излучения от частоты ВН, высоты её отражения и времени суток.

В третьей главе представлены результаты анализа стационарных спектров ИРИ во всём рабочем диапазоне стенда «Сура» ($4.3 < f_0 < 9.5$ МГц), основанные на данных, накопленных в течение 1996 – 2004 г. Основное внимание уделено экспериментальным исследованиям спектров искусственного радиоизлучения ионосферы при быстром свипировании частоты ВН в узкой окрестности четвёртой ($n = 4$) и пятой ($n = 5$) гармоник электронной циклотронной частоты nf_{ce} . Свипирование частоты проводилось при длительном (непрерывном) вертикальном и наклонном (14° и 18° к югу от вертикали) воздействии.

В разделе 3.1 описываются свойства основных спектральных компонент ИРИ. Искусственное радиоизлучение ионосферы, наблюдается в экспериментах как слабая ($- (50 - 90)$ дБ) широкополосная (до 200 кГц) шумовая компонента в спектре отраженного от ионосферы сигнала волны накачки (ВН). ИРИ было достаточно подробно изучено ранее. К настоящему времени, установлена классификация различных спектральных компонент ИРИ на основе длительных многолетних исследований стационарных и динамических характеристик ИРИ, выполненных на действующих нагревных стендах (EISCAT, «Сура», HAARP, Arecibo) в частотном диапазоне накачки $2.8 \text{ МГц} < f_0 < 10 \text{ МГц}$ при различных ионосферных и геофизических условиях (критических частотах ионосферы, наклона магнитного поля Земли к вертикали). В спектре ИРИ присутствуют следующие основные компоненты (см. рис. 1): главный спектральный максимум (downshifted maximum, DM) и его сателлиты 2DM и 3DM; положительный максимум (upshifted maximum, UM), широкий положительный максимум (broad upshifted maximum, BUM), узкополосная и широкополосная компоненты (narrow continuum, NC, broad continuum, BC), а также широкая положительная структура (broad upshifted structure, BUS), и др.

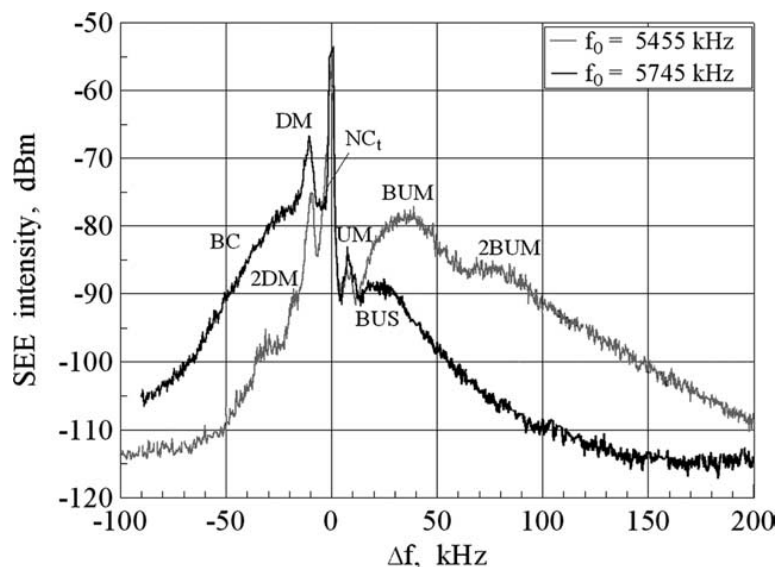


Рис. 1. Примеры спектров ИРИ в областях над гармоникой (II) $f_0 = 5455$ кГц и в области сильного излучения (III) $f_0 = 5745$ кГц

В разделе 3.2 представлены результаты систематического исследования зависимости стационарных (при длительном нагреве) спектров искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) от частоты волны накачки f_0 . Исследования были выполнены на стенде «Сура» в частотном диапазоне $4.3 < f_0 < 9.5$ МГц с различным шагом частот накачки от 1 кГц вблизи гирогармоник nf_{ce} от $n = 4$ до $n = 7$ (здесь спектры ИРИ существенно изменяются при малых изменениях f_0), до 20 – 50 кГц между гирогармониками. Результаты основаны на данных, накопленных в течение 1996 – 2004 гг. Установлены и подробно изучены основные тенденции в поведении самых интенсивных спектральных компонент ИРИ (их максимальные и полные интенсивности, и позиции в спектре) в зависимости от f_0 . Основное внимание обращено на сравнительный анализ поведения всех компонент ИРИ во всем частотном диапазоне ВН. Полученные результаты подтвердили цикличность спектров ИРИ, то есть подобная зависимость спектральной формы ИРИ (и всех компонент ИРИ) на частоте накачки f_0 между последовательными гирогармониками $nf_{ce} < f_0 < (n + 1)f_{ce}$ для всех номеров гармоники, $3 < n < 7$. Такая цикличность сопровождается, однако, рядом особенностей в зависимости спектров и интенсивностей ИРИ от f_0 (и для общих характеристик (раздел 3.2) и для отдельных компонент (подразделы 3.2.1 – 3.2.6 (DM, UM, BC, NC, BUM и BUS соответственно)) во всем частотном диапазоне стенда «Сура».

Установлено следующее:

1. Интенсивность всех компонент ИРИ в стационарном состоянии максимальны для $4f_{ce} < f_0 < 5f_{ce}$ и уменьшаются с ростом n . Сильный overshoot–эффект в развитие BC и DM после включения ВН обеспечивает основное снижение стационарной интенсивности ИРИ для $3f_{ce} < f_0 < 4f_{ce}$. В этом диапазоне максимум интенсивности DM и BC за время после включения ВН, сопоставим, и даже превышает ее для $4f_{ce} < f_0 < 5f_{ce}$. Между последовательными гирогармониками существуют пять отличительных частотных диапазонов: (I) "*Резонансная область*", $f_0 \approx nf_{ce}$. Здесь ИРИ подавлено почти полностью, за исключением BUM так же как UM и NC_p в некоторых случаях (В стационарных спектрах NC может быть классифицирован как NC_p или FNC. Во всех других диапазонах NC – "тепловой NC" или SNC. (II) "*Область выше гармоники*", $f_0 \geq nf_{ce}$. Здесь NC, семейство DM и BUM присутствуют в спектре, и интенсивность NC и DM и спутников растет с f_0 , но интенсивность BUM начинает уменьшаться. (III) "*Область сильного излучения*", $f_0 > nf_{ce}$. Здесь интенсивны семейство DM, NC, BC и BUS присутствует в спектре ИРИ. (IV) "*Область слабого излучения*", $f_0 < (n+1)f_{ce}$. Здесь только семейство DM, NC и BC наблюдаются в спектре ИРИ, и они намного более слабы, чем в области III. (V) "*Область ниже гармоники*", $f_0 \leq (n+1)f_{ce}$. Здесь снова семья DM и BC усиливается в спектрах, но BUM еще отсутствует.

2. Для всего частотного диапазона ВН между гирогармониками относительный вклад спектров "каскадного типа" (семейство DM) по сравнению со спектрами "типа континуума" (BC первого типа) увеличивается с f_0 , и семейство DM преобладает над BC для $n > 5$. Для узкой *Области ниже гармоники* (V), наоборот, BC второго типа преобладает над семейством DM для $n \geq 5$.

3. Максимальная интенсивность UM и ее отстройка частоты Δf_{UM} зависят от f_0 подобно DM, за исключением узкой резонансной области около гирогармоник. В этой области максимальная интенсивность UM и подавление DM происходят приблизительно на той же частоте накачки $f_0 \approx f_{0,DM}$, в то время как минимальная интенсивность UM (подавление) и максимальная интенсивность DM имеет место при меньшей частоте $f_0 \approx f_{0,UM}$.

4. При проходе частоты волны накачки через резонансную область снизу BUM появляется в спектре ИРИ при $f_0 > f_{0,UM}$, но ниже чем $f_{0,DM}$. Наиболее интенсивное излучение в области BUM наблюдается на частоте накачки несколько выше чем $f_{0,DM}$. Другие компоненты ИРИ в области положительных отстроек (UM и BUS) достигают максимальной интенсивности при частотах ВН значительно выше гирогармоник вместе с компонентами в области отрицательных отстроек (DM и ВС первого типа).

5. Острый излом наклона спектра ИРИ между f_0 и частотой высокочастотного края DM, показывает, что ВС начинается в спектре ИРИ при меньших $|\Delta f|$, чем это считалось ранее. Этот излом отделяет компоненты NC_t и ВС, и приближается к частоте накачки в диапазонах III и V с хорошо развитым ВС, приближается к высокочастотному краю DM во II и IV областях. В области I NC должен быть классифицирован как NC_p .

Для определения значений частот ВН, при которой «начинается» генерация BUM при проходе гирогармоники снизу, а также более точного определения значений частот минимальной интенсивности DM и UM $f_{0,DM}$ и $f_{0,UM}$ требуются измерения в стабильных ионосферных условиях (постоянная высота области взаимодействия ВН с ионосферной плазмой), результаты которых приводятся в разделе 3.3.

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментальных исследований стационарных спектров искусственного радиоизлучения ионосферы при быстром свипировании частоты волны накачки f_0 и диагностической волны $f_{дв}$ в окрестности четвертой ($n = 4$) и пятой ($n = 5$) гармоник электронной циклотронной частоты nf_{ce} . Свипирование частоты проводилось при длительном (непрерывном) вертикальном и наклонном (14° и 18° к югу от вертикали) воздействии.

В подразделе 3.3.1 приводится описание постановки серии экспериментов по исследованию характеристик спектральных компонент ИРИ при быстром свипировании частоты ВН в области четвертой и пятой гармоник электронного циклотронного резонанса. Время всего сеанса свипирования варьировалось в пределах 5 – 10 мин. в зависимости от шага дискретизации частоты. В более ранних исследованиях время, необходимое для регистрации сигнала на одной частоте ВН, и, следовательно, для детального исследования спектров ИРИ в непосредственной близости гирогармоники, оказывалось существенно большим, и движения в ионосфере могли заметно влиять на результаты экспериментов.

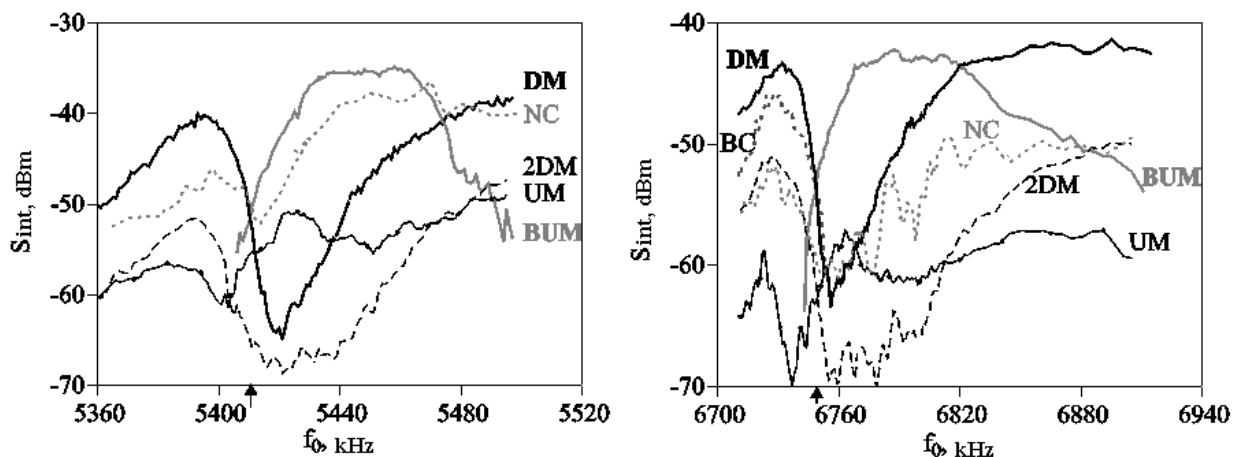


Рис. 2. Поведение интегральной интенсивности основных верхнегибридных компонент ИРИ при проходе частоты волны накачки через $4f_{ce}$ и $5f_{ce}$.

В подразделе 3.3.2 представлены результаты экспериментов при вертикальном воздействии. Показана последовательность спектров ИРИ при свипировании частоты ВН f_0 через четвертую и пятую giroгармоники. Представлены зависимости максимальной (пиковой) интенсивности компонент DM, UM и BUM, а также отстройки пика BUM-компоненты Δf_{BUM} от частоты ВН соответственно для $f_0 \sim 4f_{ce}$ и $f_0 \sim 5f_{ce}$. Также приведены зависимости интегральной интенсивности этих компонент и компонент BC, NC и 2DM от f_0 (см. рис. 2).

Результаты экспериментов при наклонном воздействии представлены в подразделе 3.3.3. Показаны зависимости интенсивности спектральных максимумов ИРИ – DM, UM и BUM и отстройки BUM df_{BUM} от частоты ВН f_0 при свипировании f_0 в области $4f_{ce}$ при наклоне диаграммы направленности стенда СУРА на юг на 14° и 18° к югу от вертикали.

В разделе 3.4 приводятся результаты исследований стационарных спектров ИРИ, выполненных при быстром изменении частоты волны накачки в области 4-й и 5-й электронных giroгармоник, обеспечивающем стабильность ионосферных условий и высокую интенсивность мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы, а также при воздействии на ионосферу короткими импульсами, в том числе при дополнительном нагреве ионосферы на частотах вдали от giroгармоник, установлено, в частности, следующее.

1. Формирование интенсивных мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы при длительном воздействии на ионосферу обеспечивает сам факт генерации искусственного радиоизлучения в области верхнего гибридного резонанса волны накачки и существенно влияет на интенсивность ИРИ. В свою очередь, форма спектра «верхнегибридных» компонент ИРИ и факт практически полного их подавления при прохождении частоты волны накачки f_0 через giroгармоники nf_{ce} определяются дисперсионными свойствами и характером взаимодействия высокочастотных плазменных мод, а также близостью их частот к giroгармонике. Зависимость вида спектра ИРИ от соотношения f_0 и nf_{ce} исчезает при воздействии короткими импульса-

ми, когда мелкомасштабные неоднородности не успевают формироваться и возбуждение ИРИ определяется взаимодействием волны накачки с ленгмюровскими волнами, распространяющимися почти вдоль геомагнитного поля.

2. При прохождении частоты волны накачки f_0 через гирогармонику подавление различных спектральных компонент ИРИ происходит при одной и той же частоте самих этих компонент, совпадающей с частотой волны накачки $f_{0\min}$, при которой суммарная интенсивность всех компонент ИРИ оказывается минимальной. Согласно существующим теоретическим представлениям эта частота совпадает с частотой двойного резонанса $f_d \approx nf_{ce}$ ($h_d \approx f_{uh}(h_d)$), что позволяет, используя существующие модели геомагнитного поля, определять с высокой точностью магнитную индукцию, концентрацию плазмы и высоту области двойного резонанса h_d .

3. Наиболее вероятным механизмом генерации «верхнегибридных» компонент ИРИ в области гирогармоник является двойная трансформация (электромагнитных волн в плазменные и обратно) на мелкомасштабных плазменных неоднородностях с промежуточной стадией формирования спектра плазменных волн за счёт процессов взаимодействия высокочастотных плазменных волн, например индуцированного рассеяния или распада с участием нижнегибридных волн. В то же время при $f_0 \approx f_{0\min} \approx f_d$, когда подавляется трансформация волны накачки в верхнегибридные волны, заметную роль в формировании спектра плазменных волн, ответственных за генерацию компоненты DM, может играть процесс прямого распада волны накачки на верхнегибридную и нижнегибридную волны.

4. Наиболее вероятным механизмом генерации компоненты BUM искусственного радиоизлучения ионосферы является трансформация (рассеяние) верхнегибридных волн с частотами, превышающими f_d , на мелкомасштабных плазменных неоднородностях. Полученная зависимость положения пика BUM в спектре ИРИ от f_0 свидетельствует в пользу того, что генерация этой компоненты при достаточно больших значениях $f_0 - nf_{ce}$ происходит заметно ниже высоты двойного резонанса h_d .

5. При достаточно большом наклоне диаграммы направленности нагревного стенда от вертикали (к югу в наших экспериментах) интенсивность ИРИ при $f_0 \leq nf_{ce}$ заметно уменьшается по сравнению с частотами волны накачки $f_0 > nf_{ce}$, что определяется различными областями (высотами) существования плазменных волн в этих случаях и уменьшением высоты отражения волны накачки при увеличении наклона.

В четвёртой главе представлены результаты анализа конкуренции компонент ИРИ, связанных с ленгмюровскими и ВГ волнами, а также между эффектами ССВ и аномальным ослаблением ВН (АО) после переключения режима работы волны накачки с непрерывного нагрева на короткие импульсы. Анализ проводился по данным эксперимента, выполненного на стенде «Сура» в сентябре 1998 г. Воздействие на ионосферу проводилось на частотах ВН вблизи 5-й гирогармоники $f_0 \approx 5f_{ce}$, регистрация ИРИ и отраженного сигнала ВН проводилась с использованием программируемого спектранализа-

тора HP3587S с динамическим диапазоном 23 бит и максимальной частотой дискретизации АЦП 20 Msamples/sec.

В разделе 4.1 кратко описаны физические особенности процессов, протекающих при длительном и коротком воздействии, и методика, позволяющая в ходе эксперимента исследовать конкуренцию «быстрых» процессов, связанных с возбуждением СПН, и формированием спектра плазменных волн (характерные времена \sim нескольких мс), и «медленных», определяющихся динамикой мелкомасштабных неоднородностей ($\sim 0.5 - 5$ с).

В разделе 4.2 приведены результаты эксперимента. Показано, что после перевода режима излучения волны накачки из непрерывного в импульсный мелкомасштабные неоднородности начинают релаксировать, что приводит к уменьшению аномального ослабления пробных волн, появлению эффекта ССВ и «пичков» на сигнале ВН во время излучения импульсов, *overshoot*-эффекту для ИРИ в области главного спектрального максимума и широкополосной компоненты, росту NCM и NC компонент ИРИ, и заметному спаду интенсивности UM и BUM компонент.

В разделе 4.3 обсуждаются физические причины такого поведения ИРИ и отраженного сигнала накачки, связанные с релаксацией мелкомасштабных неоднородностей и исчезновением «экранировки» точки отражения ВН за счет рассеяния ВН в верхнегибридные волны на мелкомасштабных неоднородностях. Обсуждается также вклад мелкомасштабных неоднородностей различных размеров в генерацию и подавление (за счет АО) различных компонент ИРИ.

В разделе 4.4 даны краткие выводы раздела 4.

В Заключение приведены основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе исследования характеристик эффекта стрикционного самовоздействия ВН и динамики ИРИ изучена зависимость пороговых полей возбуждения СПН и характерных времён затухания ИРИ от частоты ВН, высоты её отражения и времени суток. Использование одновременных измерений динамики сигналов ВН и ИРИ позволило экспериментально определить декременты затухания плазменных волн γ_e по времени релаксации ИРИ для различных условий проведения измерений и использовать его как дополнительный независимый параметр при сопоставлении результатов эксперимента с теоретическими представлениями. Для всего цикла измерений получена характерная зависимость порогового поля СПН $E_{\text{п}} \sim (\gamma_e f_0)^{0.5}$, практически совпадающая с теоретической. Для дневных условий измеренные значения γ_e значительно превосходят декремент затухания из-за столкновений, что связывается с бесстолкновительным затуханием плазменных волн на фотоэлектронах. В вечерних условиях пороговые поля и декременты приближаются к расчётным, полученным в приближении столкновительного затухания плазменных волн.

2. По данным многолетних измерений в течение половины цикла солнечной активности во всем диапазоне рабочих частот стенда «Сура» $4.3 < f_0 < 9.5$ МГц. подтверждена цикличность (периодичность) зависимости вида спектров ИРИ от f_0 с шагом (периодом), равным электронной циклотронной частоте f_{ce} – подобие зависимости спектральной формы ИРИ (и всех компонент ИРИ) от частоты накачки f_0 между последовательными гирогармониками. Дана классификация основных частотных диапазонов между последовательными гирогармониками, где спектры ИРИ носят существенно различный характер. Выделены особенности в поведении различных спектральных компонент спектра ИРИ в различных областях диапазона рабочих частот.

3. Детально исследовано поведение стационарных спектров ИРИ при переходе f_0 через nf_{ce} ($n=4,5$). Установлено следующее. (а) Формирование интенсивных мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы при длительном воздействии на ионосферу обеспечивает сам факт генерации искусственного радиоизлучения в области верхнего гибридного резонанса волны накачки и существенно влияет на интенсивность ИРИ, тогда как форма спектра «верхнегибридных» компонент ИРИ и факт практически полного их подавления при прохождении частоты волны накачки f_0 через гирогармоники nf_{ce} определяются дисперсионными свойствами и характером взаимодействия высокочастотных плазменных мод, а также близостью их частот к гирогармонике. (б) При прохождении f_0 через nf_{ce} подавление различных спектральных компонент ИРИ происходит при одной и той же частоте самих этих компонент, совпадающей с частотой волны накачки f_{0min} , при которой суммарная интенсивность всех компонент ИРИ оказывается минимальной. Эта частота совпадает с частотой двойного резонанса, что позволяет определять с высокой точностью магнитную индукцию, концентрацию плазмы и высоту области двойного резонанса. (в) Наиболее вероятным механизмом генерации «верхнегибридных» компонент ИРИ в области гирогармоник является двойная трансформация электромагнитных волн в плазменные и обратно на мелкомасштабных неоднородностях с промежуточной стадией формирования спектра плазменных волн за счёт процессов нелинейного взаимодействия плазменных волн. В то же время при $f_0 \approx f_{0min}$, заметную роль в формировании спектра ИРИ может играть процесс прямого распада волны накачки на верхнегибридную и нижнегибридную волны. (г) Наиболее вероятным механизмом генерации компоненты «широкий верхний максимум» в спектре ИРИ является трансформация (рассеяние) верхнегибридных волн с частотами, превышающими f_{0min} , на мелкомасштабных неоднородностях. При достаточно больших значениях $f_0 - nf_{ce}$ генерация происходит заметно ниже высоты двойного резонанса. (д) При достаточно большом наклоне диаграммы направленности нагревного стенда от вертикали (к югу в наших экспериментах) интенсивность ИРИ при $f_0 \leq nf_{ce}$ заметно уменьшается по сравнению с частотами волны накачки $f_0 > nf_{ce}$, что определяется различными областями (высотами) существования плазменных волн в этих случаях и уменьшением высоты отражения волны накачки при увеличении наклона.

4. Установлено, что при переключении режима излучения ВН от непрерывного к коротким диагностическим импульсам с малой скважностью релаксация мелкомасштабных неоднородностей обеспечивает релаксацию аномального ослабления электромагнитных волн, (включая ИРИ), а также снижение эффективности генерации «верхнегибридных» компонент ИРИ. Это приводит к восстановлению эффектов, связанных с СПН вблизи и ниже точки отражения ВН, в частности ССВ и генерации «ленгмюровских» компонент ИРИ.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Е.Н. Сергеев, С.М. Грач, П.В. Котов. Исследование условий возбуждения и характеристик ионосферной плазменной турбулентности на стадии развития стрикционной параметрической неустойчивости. //Изв. ВУЗов Радиофизика. 2004. Т. 47. № 3. С. 209–230.

2. E.N. Sergeev, V.L. Frolov, S.M. Grach, P.V. Kotov, On the morphology of Stimulated Electromagnetic Emission spectra in a wide pump wave frequency range. //Advances in Space Research, 2006. V. 38. Issue 11, P. 2518-2526.

3. Сергеев Е. Н., Грач С. М., Котов П. В., Комраков Г.П., Бойко Г.Н., Токарев Ю.В. Диагностика возмущенной области ионосферы с помощью широкополосного радиоизлучения //Известия вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 8. С. 649-668.

4. Kotov, P.V., Norin, L., Sergeev, E.N., Grach S.M., and Thide, B. Recovery of the ponderomotive parametric instability after long pumping of the ionosphere. //Advances in Space Research, 2007. V. 40. Issue 3, P. 377-383.

5. Котов П.В., Сергеев Е.Н., Грач С.М.. Спектры искусственного радиоизлучения ионосферы при свипировании частоты воздействия в области электронных циклотронных гармоник. I. Результаты эксперимента //Изв. Вузов радиофизика. 2008. Т. 51. №6. С. 461-477.

6. С.М. Грач, Е.Н. Сергеев, В.А. Яшнов, П.В. Котов. Спектры искусственного радиоизлучения ионосферы при свипировании частоты воздействия в области электронных циклотронных гармоник. II. Обсуждение результатов //Изв. Вузов радиофизика. 2008. Т. 51, №7. С. 553-570.

7. С.М. Грач, П.В. Котов, Е.Н. Сергеев. Экспериментальные исследования условий возбуждения стрикционной параметрической неустойчивости в ионосферной плазме. //Труды (Седьмой) Научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию со дня рождения В.С.Троицкого, 7 мая 2003 г., Нижний Новгород 2003. С. 98-99.

8. С. М. Грач, М. А. Кострова, П. В. Котов, Е.Н. Сергеев. О свойствах искусственного радиоизлучения ионосферы, инициированного слабой диагностической волной с частотой вблизи 4-й электронной giroгармоники. //Труды (восьмой) научной конференции по радиофизике, посвященной 80-

летию со дня рождения Б.Н.Гершмана. 7 мая 2004 г. /Ред. А.В.Якимов. - Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2004. 276 с. С. 60-61.

9. С.М.Грач, П.В.Котов, Е.Н.Сергеев, М.М.Шварц, В.А.Яшнов. Сопоставление свойств искусственного радиоизлучения ионосферы при вертикальном и наклонном воздействии радиоволной с частотой вблизи 4-й электронной гирогармоники. //Труды (Девятой) Научная конференция по радиофизике «Факультет – ровесник Победы», 7 мая 2005 г., Нижний Новгород. 2005. С.73-75.

10. П.В. Котов, Е.Н. Сергеев, С.М. Грач, Г.Н. Бойко, Г.П. Комраков. Исследование спектров искусственного радиоизлучения ионосферы в экспериментах по свипированию частоты мощной радиоволны в области гармоник электронного циклотронного резонанса. //Сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 2005. Т.2. С. 103-107.

11. S.M. Grach, M.J. Kosch, E.N. Sergeev, P.V. Kotov, G.P. Komrakov, Simultaneous observations of the HF-induced red line airglow and stimulated electromagnetic emission at the “Sura” in September 2004: Preliminary results. In “Effects of Artificial Action on the Earth Ionosphere by Powerful Radio Waves”, VI International Suzdal URSI Symposium ISS-04, Moscow, October 2004, Book of Abstracts, Nizhny Novgorod, 2004, p.40.

12. E.N. Sergeev, G.N. Boiko, V.L. Frolov, G.P. Komrakov, S.M. Grach, P.V. Kotov, Diagnostics of the ionosphere turbulence volume by wide frequency band signals. In “Effects of Artificial Action on the Earth Ionosphere by Powerful Radio Waves”, VI International Suzdal URSI Symposium ISS-04, Moscow, October 2004, Book of Abstracts, Nizhny Novgorod, 2004, p.46.

13. E.N. Sergeev, G.N. Boiko, S.M. Grach, P.V. Kotov, Study of Langmuir turbulence by measuring narrow continuum SEE feature. On CD “Abstracts, 35th COSPAR Scientific Assembly 2004, Paris, France, 18-25 July 2004, www.cospar2004.org”, abstract no. COSPAR04-A-03432, paper no. C5.1/D4.1-0034-04.

14. E.N. Sergeev, G.N. Boiko, S.M. Grach, P.V. Kotov, Langmuir related narrow continuum SEE feature: peculiarities and fine structure. In “Effects of Artificial Action on the Earth Ionosphere by Powerful Radio Waves”, VI International Suzdal URSI Symposium ISS-04, Moscow, October 2004, Book of Abstracts, Nizhny Novgorod, 2004, p.47.

15. E.N. Sergeev, V.L. Frolov, S.M. Grach, P.V. Kotov, M.M. Shvarts, SEE applications for studying spatial characteristics of ionospheric turbulence. In “Effects of Artificial Action on the Earth Ionosphere by Powerful Radio Waves”, VI International Suzdal URSI Symposium ISS-04, Moscow, October 2004, Book of Abstracts, Nizhny Novgorod, 2004, p.49.

16. E.N. Sergeev, V.L. Frolov, S.M. Grach, P.V. Kotov, Morphology of SEE spectral features in a wide pump wave frequency range. On CD “Abstracts, 35th COSPAR Scientific Assembly 2004, Paris, France, 18-25 July 2004, www.cospar2004.org.”, abstract no. COSPAR04-A-03407, paper no. C5.1/D4.1-0032-04.

17. E.N. Sergeev, V.L. Frolov, S.M. Grach, P.V. Kotov, Behaviour of SEE spectral features in a wide pump wave frequency range. In "Effects of Artificial Action on the Earth Ionosphere by Powerful Radio Waves", VI International Suzdal URSI Symposium ISS-04, Moscow, October 2004, Book of Abstracts, Nizhny Novgorod, 2004, p.48.

18. E. N. Sergeev, G. N. Boiko, M. M. Shvarts, S. M. Grach, P. V. Kotov, Monitoring of ionospheric turbulence spatial features by SEE diagnostic tools. On CD "Abstracts, 35th COSPAR Scientific Assembly 2004, Paris, France, 18-25 July 2004, www.cospar2004.org.", abstract no. COSPAR04-A-03426, paper no. C5.1/D4.1-0033-04.

19. Grach S. M., Sergeev E. N., Thide B., Kotov P. V., Diagnostic Possibilities of the SEE measurements with a High Temporal Resolution, On CD: Proceedings of the 12th Annual RF Ionospheric Interactions Workshop, Santa FE , NM, April 25-28, 2006.

20. Grach, S. M.; Sergeev, E. N.; Thide, B.; Kotov, P. V.; Norin, L. Progress in diagnostics of pump-driven UH turbulence of the ionosphere by measurements of the SEE electromagnetic emissions with a high temporal resolution (solicited), On CD: COSPAR Scientific Assembly Beijing, China, 16-23 July 2006, Abstracts; Abstract no. COSPAR2006-A-03648; paper no. C5.2-0021-06.

21. Grach, S. M.; Sergeev, E. N.; Kotov, P. V. New results on SEE behavior during pump frequency sweep through gyroharmonics. On CD: COSPAR Scientific Assembly Beijing, China, 16-23 July 2006, Abstracts; Abstract no. COSPAR2006-A-03554; paper no. C5.2-0022-06.

22. Sergeev, E.N.; Shvarts, M.M.; Grach, S.M.; Frolov, V.L.; Kotov, P.V. Study of altitude characteristics of the striation spectrum by SEE measurements and modelling. On CD: COSPAR Scientific Assembly Beijing, China, 16-23 July 2006, Abstracts; Abstract no. COSPAR2006-A-03674; paper no. C5.2-0041-06.

23. Kotov, P. V.; Norin, L. D.; Grach, S. M.; Sergeev, E. N.; Thide, B. Recovery of ponderomotive parametric instability after long pumping of the ionosphere. On CD: COSPAR Scientific Assembly Beijing, China, 16-23 July 2006, Abstracts; Abstract no. COSPAR2006-A-03555; paper no. C5.2-0039-06.

24. Sergeev, E.N.; Grach, S.M.; Komrakov, G.P.; Kotov, P.V. Diagnostics of ionospheric turbulence by pulse wideband signals. On CD: COSPAR Scientific Assembly Beijing, China, 16-23 July 2006, Abstracts; Abstract no. COSPAR2006-A-03673; paper no. C5.2-0042-06.

25. Grach S.M., Sergeev E. N., Kotov P. V., Yashnov V. A. Stimulated electromagnetic emission during pump frequency sweep through electron gyroharmonics. Experimental results and physical conclusions. //VII International Suzdal URSI symposium Modification of Ionosphere by powerful radio waves. Moscow, October 16-18, 2007. Book of Abstracts. Troitsk 2007. P. 27.