

На правах рукописи



Рябов Александр Владимирович

**Генерация низкочастотных радиоволн в верхней ионосфере  
при воздействии на нее мощным радиоизлучением стенда  
СУРА**

01.04.03 — радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2018

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: кандидат физико-математических наук, с.н.с.,  
Котик Дмитрий Самойлович,  
НИРФИ ННГУ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией  
Пилипенко Вячеслав Анатольевич,  
ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю.  
Шмидта Российской академии наук

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт динамики геосфер  
Российской академии наук (ИДГ РАН)

Защита состоится «31» октября 2018 года в 15:00 на заседании  
диссертационного совета Д 212.166.07 по адресу: 603950, г.Нижний  
Новгород, пр.Гагарина, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
ННГУ и на официальном сайте (<http://www.unn.ru/>).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

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



Клюев  
Алексей  
Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой — один из фундаментальных разделов физики. В частности, исследование эффектов воздействия мощного КВ радиоизлучения на плазму ионосферы Земли является одним из наиболее актуальных направлений в современной радиофизике. Данное направление получило широкое развитие еще в 70х–80х годах, когда были построены первые коротковолновые стенды для воздействия на ионосферу. Тогда значительная часть исследований была посвящена генерации сигналов в диапазоне от долей герца до 10 кГц, вызванных воздействием мощных модулированных радиоволн КВ диапазона на ионосферу. Наблюдаемые эффекты генерации искусственных низкочастотных сигналов получили адекватную интерпретацию на базе механизма модуляции квазистационарных токов, протекающих в нижней ионосфере, включая авроральный электроджет.

Эксперименты по периодическому нагреву ионосферы были начаты в 70-е годы в г. Горьком под руководством Г.Г. Гетманцева [1]. Одной из задач таких экспериментов было исследование генерации сигналов комбинационных частот в низкочастотном ОНЧ/УНЧ диапазоне (от 1кГц до нескольких килогерц) радиоволн при облучении ионосферы мощным модулированным КВ сигналом. В 1980 году было зарегистрировано научное открытие «Явление генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового радиоизлучения — Эффект Гетманцева» [2].

Позднее, благодаря увеличению на порядок мощности КВ передатчиков и широкополосности применяемых антенн, был существенно расширен диапазон частот исследований эффекта генерации, особенно в сторону низких частот, вплоть до диапазона микропульсаций (0.1–30 Гц). Во многом этому способствовало строительство новых мощных нагревных стендов: EISCAT (Тромсе, Норвегия) в 1980 г. [3] и СУРА (Васильсурск, Россия) в 1982г.

Исследования явлений взаимодействия ионосферной плазмы с полем мощного радиоизлучения послужили стимулом к созданию стенда HAARP на Аляске в 2008–2010 годах. Уже в первых экспериментах по генерации сигналов в КНЧ диапазоне был обнаружен новый класс КНЧ сигналов, не связанных с модуляцией ионосферных токов. Амплитуда этих сигналов не зависела от геомагнитной активности, к тому же, они наблюдались и в ночное время. Подобного рода КНЧ сигналы были обнаружены на стенде СУРА в 2010 г. В настоящей работе исследуются свойства таких сигналов по результатам экспериментальных исследований 2010–2015 годов [A1–A3]. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал об особенностях генерации и свойствах сигналов в ОНЧ и КНЧ диапазонах.

Особый интерес представляют искусственные источники низкочастотных радиоволн, полученные методом генерации низкочастотных волн в ионосферной плазме модулированным КВ радиоизлучением. В настоящее время данное направление исследований активно развивается.

### **Цели и задачи работы**

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование генерации низкочастотных радиоволн в верхней ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением стенда СУРА. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие научно-технические задачи:

1. Исследование характеристик искусственных низкочастотных радиосигналов, вызванных воздействием на ионосферу мощным КВ радиоизлучением в различных геомагнитных условиях.
2. Определение положения источника искусственного низкочастотного радиоизлучения ионосферы в экспериментах на стенде СУРА в условиях ночной ионосферы.
3. Синхронизация приемопередающей аппаратуры стенда СУРА с помощью спутниковой системы GPS.

### **Методы исследований**

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, методы цифровой обработки сигналов (БПФ, метод наложения эпох, синхронное детектирование).

При проведении численного анализа использовалась среда программирования Матлаб, для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые на средних широтах были обнаружены низкочастотные сигналы (3–30Гц), генерируемые в результате воздействия мощными КВ радиоволнами на ионосферу в ночных условиях.
2. Впервые измерены амплитудные характеристики наблюдаемых на поверхности Земли искусственных низкочастотных радиосигналов в экспериментах на стенде СУРА при различных уровнях геомагнитной активности.
3. Определено положение искусственного источника радиосигнала в F-слое ионосферы в экспериментах на стенде СУРА в ночных условиях

4. Выполнен численный расчёт распределения плотности нелинейного диамагнитного тока в ионосфере, возникающего в поле неоднородного пучка электромагнитных волн в экспериментах на стенде СУРА, а также распределение продольной и поперечной компоненты вектора  $\mathbf{B}$  внутри источника.

### **Научная и практическая ценность работы**

1. Воздействие на ионосферу с помощью стенда СУРА позволяет создать контролируемый источник низкочастотных радиоволн в диапазоне 3–30 Гц, свойства таких сигналов экспериментально исследованы в данной работе. Сигналы от источника низкочастотных радиоволн в ионосфере могут быть обнаружены на значительных расстояниях (4400 км в работе [4], 2100 км, 4700 км и 7400 км от источника в работах [5,6]). Контролируемый источник может быть использован для исследования условий распространения в волноводе Земля–ионосфера, зондирования магнитосферы [4].
2. В ходе диссертационного исследования были введены в эксплуатацию диагностические комплексы, которые могут быть использованы на стенде СУРА для измерений параметров ионосферы: ионозонд CADI, двухчастотный приемник спутниковых сигналов GPS/GLONASS Prego-T. Разработана автоматизированная система управления и контроля передатчиками стенда СУРА, синхронизованная с мировым временем с точностью 20 нс.

### **Достоверность полученных результатов подтверждается:**

1. Статистической повторяемостью наблюдаемых результатов при многократном повторении экспериментальных исследований
2. Использованием современных высокоточных приборов и широко известных методик регистрации и математической обработки данных
3. Сопоставлением результатов численного анализа и экспериментальных данных
4. Сопоставлением результатов наблюдений с опубликованными результатами других авторов

### **На защиту выносятся следующие результаты и положения:**

1. Результаты экспериментальных исследований:
  - а. зависимость амплитуды искусственных низкочастотных сигналов (3–30 Гц) от соотношения несущей частоты волны накачки и критической частоты F-слоя ионосферы.

- b. влияние наклона луча антенны стенда СУРА в плоскости север-юг на амплитуду низкочастотных сигналов.
  - c. зависимости амплитуды искусственных низкочастотных сигналов от геомагнитных условий при слабой возмущённости ( $K_p \leq 4$ ) и во время более сильных геомагнитных бурь ( $K_p \geq 5$ ).
2. Аппаратно-программный комплекс, позволяющий вести регистрацию низкочастотных компонент магнитного поля с синхронизацией приемопередающей аппаратуры стенда СУРА по сигналам GPS. Комплекс позволяет регистрировать и проводить анализ тангенциальных компонент магнитного поля, определять высоту расположения источника искусственного низкочастотного радиоизлучения.
  3. Результаты численного расчета распределения плотности нелинейного диамагнитного тока в ионосфере, возникающего в поле неоднородного пучка электромагнитных волн.

### **Апробация работы**

Результаты исследований были представлены на российских и международных конференциях: конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, ИКИ РАН, 2013, 2014), COSPAR Scientific Assembly (Москва, МГУ, 2014), конференция молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Обнинск, НПО «Тайфун», 2013), RF Interaction Workshop (Пуэрто-Рико, 2013, Санта-Фе, 2010), American Geophysical Union (Сан-Франциско, 2012), Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» (Йошкар Ола, МарГТУ, 2011), Нижегородская сессия молодых ученых (Нижний Новгород, 2009, 2011).

Результаты исследований использовались при выполнении контрактов в рамках ФЦП «Геофизика»: Разработка предложений по оснащению нагревного стенда СУРА измерительной аппаратурой (2008–2010); Организация и проведение экспериментальных исследований особенностей взаимодействия мощных КВ-радиоволн с ионосферой в зависимости от режимов работы радионагревного стенда СУРА и метеорологических и гелиогеофизических условий (2009–2012); Экспериментальные исследования особенностей взаимодействия мощных КВ радиоволн с ионосферой в зависимости от режимов работы радионагревного стенда СУРА и метеорологических и гелиогеофизических условий (2012–2015).

Результаты исследований использовались при выполнении работ в рамках Государственного задания (проект № 3547), при выполнении работ по грантам РФФИ (№: 11-02-00419, 13-02-00723, 13-02-97086, 15-42-02544, 15-45-02636) и государственному контракту Министерства образования и науки РФ 16.518.11.7066.

## **Публикации по теме исследования**

Результаты настоящей диссертационной работы изложены в 15 публикациях, из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах из списка ВАК [А1–А3], 5 статей в сборниках трудов конференций [А4–А8] и 7 тезисов докладов [А9–А15].

## **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в ежегодных экспериментальных кампаниях с 2007 по 2015 годы, в ходе которых проводил измерения амплитуд низкочастотных радиоволн в приемных пунктах ФГБНУ НИРФИ: «Новая Жизнь», «Барковка», «Петровское», а также разработал и внедрил систему синхронизации передающей аппаратуры стенда СУРА с удаленными измерительными пунктами по сигналам спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Автор разработал алгоритмы и пакет программ обработки данных (программы управления стендом СУРА, регистрации низкочастотных сигналов и обработки данных), позволяющий автоматизировать проводимые эксперименты на стенде СУРА.

Автором проведен анализ всей совокупности экспериментальных данных и определены основные характеристики и зависимости наблюдаемых искусственных низкочастотных сигналов.

Автором была разработана программа в среде Matlab для численного расчета распределения нелинейного тока в верхней ионосфере.

Автором было экспериментально измерено время распространения низкочастотного сигнала от ионосферного источника и был проведен расчет высоты расположения источника.

Кроме того, автор принимал непосредственное участие в организации систем мониторинга ионосферы с помощью специализированного двухчастотного GPS приемника Javad Prego-T и цифрового ионозонда CADI.

## **Структура и объем диссертации**

Структура диссертационной работы определяется исходя из накопленных экспериментальных данных и разработанных методов их исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 124 страницы, включая 70 рисунков.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и её научная новизна, сформулированы цели и задачи, определена практическая ценность диссертации, обозначен личный вклад автора, представлены

положения, выносимые на публичную защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В главе 1 представлен обзор и анализ экспериментальных и теоретических исследований по теме диссертации.

Раздел 1.1 содержит основные экспериментальные результаты, которые были ранее получены как в России, так и за рубежом. Основное внимание уделяется развитию теории генерации сигналов комбинационных частот (СКЧ) в низкочастотном ОНЧ диапазоне (от 1 кГц до нескольких килогерц) радиоволн при облучении ионосферы мощным модулированным КВ сигналом.

В разделе 1.2 приведены результаты экспериментальных исследований генерации низкочастотных радиоволн в диапазоне 0.1–30 Гц. Здесь приводится описание эксперимента, в ходе которого впервые была определена эффективная высота ионосферного источника низкочастотного сигнала. В этом разделе проведен краткий анализ экспериментальных результатов, полученных на зарубежном стенде HAARP. Отмечен ряд достижений в КНЧ/ОНЧ генерации с февраля 2007 года.

В разделе 1.3 приведены основы теории воздействия электромагнитными волнами на ионосферную плазму, а также ряд особенностей, возникающих при воздействии модулированным излучением. Здесь приведены выражения для расчета изменения электронной температуры, частоты соударений и электронной плотности при условии воздействия на ионосферу мощным КВ радиоизлучением.

Раздел 1.4 содержит описание основных механизмов ионосферной генерации магнитных пульсаций и уравнения, описывающие процессы в нижней ионосфере, возмущенной мощным радиоизлучением. С изменением температуры электронов в диапазоне магнитных пульсаций (0.1–30 Гц) может меняться коэффициент рекомбинаций  $\alpha_{\text{эф}}$ , что приводит к изменению ионизационного баланса и колебаниям концентрации плазмы, изменение температуры также вызывает изменение частоты столкновений электронов с молекулами. Нелинейный источник такого механизма связан с модуляцией сил трения и давления, а также с модуляцией коэффициента рекомбинаций. Оценки показывают, что эффект, связанный с модуляцией коэффициента рекомбинаций, существенен для частот  $F < 0.1$  Гц. На частотах  $F > 1$  Гц основную роль играет модуляция силы трения, приводящая к появлению горизонтального тока [7,8]. Генерации низкочастотных токов в поле земли может быть также обусловлена наличием градиента давления, возникающего при омическом нагреве плазмы верхней ионосферы полем волны накачки. В основе этого механизма лежит пондеромоторная сила, возникающая благодаря наличию радиального градиента электрического поля волны накачки. Именно подобного рода механизмы были взяты за основу для расчетов структуры ионосферного источника.

В разделе 1.5 рассмотрена задача об оценке величины поля на поверхности Земли в рамках плоскостной модели среды. Такая модель позволяет получить обзорные качественные результаты. Предполагается, что точечный источник располагается на нижней границе ионосферы.

В главе 2 приведена методика проведения измерений вариаций магнитного поля в диапазонах 3–30 Гц в экспериментах на стенде СУРА. Для исследования свойств источников искусственных ионосферных радиосигналов в НИРФИ был разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий регистрировать тангенциальные компоненты магнитного поля на поверхности Земли.

В разделе 2.1 приведено описание такого комплекса, его основные характеристики и схема проводимых измерений. В среде LabView была разработана программа сбора данных, которая предназначена для оцифровки поступающих на вход измерительной аппаратуры сигналов и сохранения их в память ПК. Разработанная программа предназначена для синхронной работы совместно с устройством управления и временной привязки стенда СУРА.

В разделе 2.2 приведено описание метода контроля за состоянием ионосферы во время проведения экспериментов с помощью ионозонда CADI и специализированного приемника GPS/GLONASS Javad Prego-T. Здесь показаны методы анализа полного электронного содержания ионосферы с помощью просвечивания возмущенной области сигналами низкоорбитальных спутников, при пролете космических аппаратов над областью воздействия. Такая диагностика позволяет выявить неоднородности электронной концентрации с размерами до нескольких десятков километров. Используя полученные данные по амплитуде вариаций ПЭС, можно оценить амплитуду вариаций плотности плазмы в области взаимодействия с мощной радиоволной вблизи максимума  $F$ -слоя, задавшись некоторой моделью высотного профиля электронной концентрации [A5].

В разделе 2.3 приведены методы обработки низкочастотных сигналов: БПФ, метод наложения эпох, синхронный детектор. При БПФ анализе исходная реализация делится на интервалы 1–2 минуты, для каждого интервала вычисляется Фурье-образ. Усреднение по реализации производится без учета фазы. Результатом является спектр сигнала, предварительно откалиброванный с помощью дополнительного измерения эталонного сигнала. Метод наложения эпох заключается в разбивке исходной реализации на интервалы, кратные периоду анализируемого сигнала. Результатом усреднения является наличие либо отсутствие вариаций с заданным периодом. Синхронный детектор реализуется программными методами с помощью синус- и косинус-преобразования исходной реализации с предварительной узкополосной фильтрацией.

В главе 3 представлены основные результаты экспериментальных исследований с 2010 по 2015 годы. За этот период на стенде СУРА было

проведено интенсивное исследование искусственной ионосферной генерации сигналов в диапазоне 3–30 Гц в различных ионосферных и геомагнитных условиях. Здесь отражены основные особенности наблюдаемых в удаленных приемных пунктах вблизи стенда СУРА искусственных сигналов. Исследовалось влияние критической частоты  $F$ -слоя на величину наблюдаемых сигналов, поляризационные свойства тангенциальных компонент вариаций магнитного поля, время распространения, пространственные характеристики и влияние магнитной бури. Основная тенденция искусственных низкочастотных сигналов заключалась в росте амплитуды в полтора–два раза при превышении рабочей частоты КВ волны критической частоты  $F$ -слоя. Более наглядно зависимость от соотношения рабочей частоты и частоты  $foF2$  проявилась в эксперименте в октябре 2011 г, когда при спокойных геомагнитных условиях и сравнимых ионосферных параметрах низкочастотные сигналы 02 октября в докритическом режиме были примерно в 2 раза меньше, чем 04 октября в закритическом режиме. В экспериментах 15.06.2012–17.06.2012 в темное время суток сравнивалась поляризация сигналов в спокойный период и во время геомагнитной бури. Правая поляризация стала преобладающей во время бури по сравнению с аналогичными периодами при спокойной геомагнитной обстановке, что типично для всех наблюдаемых частот и может быть связано с изменением параметров ионосферной плазмы во время магнитной бури. В июне 2012 г был проведен эксперимент по локализации ионосферного источника низкочастотных сигналов в ночных условиях. Время распространения сигнала до точки приема на поверхности Земли непосредственно связано с высотой, на которой расположен источник. По результатам серии измерений определено, что среднее время распространения низкочастотных сигналов составляет  $(320 \pm 95)$  мс, что соответствует источнику, расположенному в  $F$ -слое ионосферы. Исследования проводились в разных приемных пунктах, по результатам наблюдений была составлена таблица, отражающая характер зависимости амплитуды наблюдаемых сигналов от расстояния до источника. 05 ноября 2011 года произошла малая магнитная буря с максимальным индексом  $K_1 = 4$ . Экспериментально установлено, что в диапазоне 3–30 Гц сигналы не коррелируют с уровнем геомагнитной активности, проявляя небольшой максимум в полуденные часы и несколько уменьшаясь к полуночи. Из этого эксперимента совершенно очевидно, что механизмы генерации в ОНЧ и КНЧ диапазонах различны. Здесь же приведено сравнение экспериментальных данных, полученных на стендах СУРА и HAARP.

Глава 4 содержит численный расчёт ионосферного источника в  $F$ -слое, обусловленного пондеромоторным механизмом генерации искусственных сигналов. Приведены основные выражения, позволяющие смоделировать пространственное распределение кольцевых токов, составляющих источник радиоизлучения, а также оценить величину поля на поверхности Земли

вблизи источника сигналов. При проведении численного анализа для определенности и удобства сравнения были выбраны параметры двух станций по модификации ионосферы: СУРА (частота 4.785 МГц, мощность 500 кВт) и HAARP (частота 2.8 МГц, мощность 3500 кВт). Высотные зависимости концентрации электронов были получены путем корректирования моделей IRI-2007 [9] по данным ионосферных зондов на момент проведения экспериментов, параметры нейтралов атмосферы из модели MSIS-E90 [10]. Расчеты показали, что в  $E$ -слое характер спада определяется частотой модуляции  $\Omega$  и зависимостью частоты столкновений  $\nu$  от температуры. Из сравнения результатов моделирования для двух нагревных станций следует, что при увеличении мощности в 4 раза магнитный момент источника возрастает в несколько десятков раз. Такое различие обусловлено самовоздействием, которое, естественно, сильнее у более мощной установки. Проверка численной модели проводилась с помощью серии экспериментальных измерений, в ходе которых регистрировались вариации магнитного поля. Из результатов измерений следует, что приведенная модель достоверно описывает процессы взаимодействия мощной волны накачки и нижней ионосферы.

В заключении приведены **основные результаты работы**:

1. Показано, что низкочастотные волны (3–30 Гц) можно генерировать в ионосфере методом нагрева ионосферы мощным КВ радиопередатчиком, при этом основную роль в ночное время играет пондеромоторный механизм генерации. В результате воздействия мощным КВ модулированным радиоизлучением в  $F$ -слое формируется ионосферный источник низкочастотных радиоволн на частоте модуляции. Данный механизм не зависит от интенсивности токов в нижней ионосфере. В частности от привязки к субавроральным широтам, и с успехом может работать в условиях средних широт. В дневных условиях в  $E$ -слое ионосферы источник низкочастотных радиоволн может быть обусловлен как пондеромоторным механизмом генерации, так и общепринятой теорией генерации СКЧ.
2. Установлено, что при превышении частоты волны накачки критической частоты  $F$ -слоя на 150–200 кГц амплитуда искусственных сигналов в экспериментах на станции СУРА увеличивается в 1.5–2 раза в вечерние часы. Дальнейшее уменьшение критической частоты ионосферы в ночное время синхронно коррелирует с уменьшением амплитуды искусственного сигнала. При уменьшении мощности воздействия на ионосферу в два раза амплитуды наблюдаемых низкочастотных сигналов уменьшаются в два раза, что говорит о квадратичности эффекта по полю.

3. Экспериментально установлено, что среднее время распространения искусственных низкочастотных сигналов в диапазоне 3–30 Гц в ночное время составляет  $(320 \pm 95)$  мс. Проведен численный расчет времени распространения низкочастотных сигналов от источника на высоте максимума  $F$ -слоя (290–310 км на момент эксперимента) с использованием модели ионосферы IRI-2007 и данных ионозонда. В результате установлено, что время распространения составляет 300 мс. Таким образом, из результатов численного расчета и экспериментальных данных следует, что источник искусственных низкочастотных сигналов в ночных условиях располагается в области максимума  $F$ -слоя.
4. Показано, что максимальные амплитуды низкочастотных сигналов наблюдались при наклоне луча антенны стенда на 16 градусов к югу. Амплитуда при этом в среднем в 2.5 раза превышает уровень сигналов, наблюдаемых при использовании излучающей антенны с вертикальной диаграммой направленности. Не было обнаружено какой-либо корреляции амплитуды искусственных низкочастотных сигналов с индексом геомагнитной активности в условиях слабой геомагнитной возмущенности ( $K_p \leq 4$ ). Во время более сильных геомагнитных бурь ( $K_p \geq 5$ ) экспериментально зафиксировано уменьшение амплитуд низкочастотных сигналов. Это обусловлено увеличением поглощения волны накачки и низкочастотных сигналов в нижней ионосфере, а также уменьшением критической частоты  $F$ -слоя ионосферы, которым обычно сопровождается магнитная буря.
5. На основании изложенных в работе механизмов генерации низкочастотного излучения проведен численный расчет с использованием данных моделей IRI-2007 [9], MSIS-E90 [10], скорректированных по данным ионозонда CADI и наземным измерениям полного электронного содержания ионосферы. При расчетах за основу использовались параметры нагревных стенов СУРА и НААРП. Рассчитано распределение плотности нелинейного дрейфового тока электронов, возникающего в поле неоднородного пучка электромагнитных волн под действием пондеромоторных сил, а также распределение продольной и поперечной компоненты вектора  $\mathbf{B}$  внутри источника. Рассмотренный механизм генерации низкочастотных радиоволн в ионосфере удовлетворительно объясняет экспериментально наблюдаемые сигналы.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Рецензируемые журналы из списка ВАК

[A1] Kotik D.S., Ryabov A.V., Ermakova E.N., Pershin A.V. Dependence of Characteristics of SURA Induced Artificial ULF/VLF Signals on Geomagnetic Activity // *Earth, Moon, and Planets*, Springer, October 2015, Volume 116, Issue 1, pp 79-88, DOI 10.1007/s11038-015-9465-y

[A2] Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н., Першин А.В., Иванов В.Н., Есин В.П., Чекрыжов В.М. Свойства УНЧ/ОНЧ сигналов, генерируемых стендом СУРА в верхней ионосфере // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2013, т. 56. № 06. с. 382–394. Переводная версия: Kotik, D.S., Ryabov, A.V., Ermakova, E.N. et al. Properties of the ULF/VLF Signals Generated by the Sura Facility in the Upper Ionosphere // *Radiophys Quantum El* (2013) 56: 344. doi:10.1007/s11141-013-9438-9

[A3] Рябов А.В., Котик Д.С. Генерация УНЧ пульсаций в ионосфере при воздействии на неё мощным КВ радиоизлучением // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, Изд. ННГУ, 2012, № 3(1), с. 65–70

### Сборники трудов конференций

[A4] Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н., Першин А.В. Особенности характеристик УНЧ/ОНЧ сигналов, генерируемых стендом СУРА в ионосфере во время геомагнитных возмущений // *Сборник тезисов 9-й конференции «Физика плазмы в солнечной системе»*, ИКИ РАН, М. с. 71, 4–8 февраля 2014 г

[A5] Рябов А.В., Котик Д.С. Синхронизация работы передатчиков стенда СУРА и удаленных измерительных пунктов с помощью сигналов спутниковых навигационных систем // *Труды конференции молодых специалистов по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды*, 4–6 июня 2013, г. Обнинск

[A6] Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н., Першин А.В., Иванов В.Н., Есин В.П., Чекрыжов В.М. Свойства УНЧ/ОНЧ сигналов, генерируемых стендом СУРА в верхней ионосфере // *Труды VIII конференции «Физика плазмы в солнечной системе»*, 4–8 февраля 2013, ИКИ РАН, Москва

[A7] Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н., Першин А.В., Иванов В.Н., Есин В.П., Дмитриев С.Н. Обнаружение сигналов в диапазоне (2–20) Гц, возбуждаемых в верхней ионосфере КВ излучением стенда СУРА // *Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн»*, т.1, с.156–159, изд. МарГТУ, 2011

[A8] Котик Д.С., Рябов А. В. Ионосферный источник искусственных микропульсаций, генерируемый пучком мощных электромагнитных волн //

### Тезисы докладов

[A9] Kotik D.S, Ryabov A.V., Ermakova E.N., Pershin A.V. Features of artificial ULF/VLF signals induced by SURA facility under increased solar activity conditions // 40th COSPAR Scientific Assembly 2014, Moscow, Abstract C5.1-0014-14

[A10] Kotik D. S., Ryabov A.V, invited report: SURA UPDATE // Proc. of the 19th RF Interaction Workshop, April 21–24, 2013, Arecibo, Puerto Rico

[A11] Ryabov A.V., Kotik D.S. Determining the ULF source altitude using phase measurements in experiments on the Sura facility // American Geophysical Union's 2012 Fall meeting, San Francisco, USA

[A12] Kotik D.S. and Ryabov A.V., invited report: New Results of Experiments on Generation ULF/VLF Waves with SURA Facility // American Geophysical Union's 2012 Fall meeting, San Francisco, USA

[A13] Kotik D.S., Ryabov A.V., Ermakova E.N. The properties of ULF/VLF signals generated by the SURA facility without ionospheric currents modulation // American Geophysical Union's 2012 Fall meeting, San Francisco, USA

[A14] Рябов А.В., Котик Д.С., Генерация УНЧ пульсаций в ионосфере при воздействии на неё мощным КВ радиоизлучением, XVI Нижегородская сессия молодых ученых, Красный плес, 18–21 апреля 2011

[A15] Ryabov A.V., Kotik D.S. VLF Generation by the SURA Facility Under Low Geomagnetic Activity // The Sixteenth Annual RF Ionospheric Interactions Workshop, 18–21 April 2010, Santa Fe, New Mexico

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Трахтенгерц В.Ю., Эйдман В.Я. Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой // Письма в ЖЭТФ. 1974. т. 20, № 4. С. 229–232.
- [2] Белов И.Ф., Бычков В.В., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А., Пашкова Г.Р. Экспериментальный комплекс СУРА для исследования искусственных возмущений ионосферы // Препринт № 167. Горький, НИРФИ, 1983г.
- [3] R. Barr and P. Stubbe. ELF radiation from the Tromsø “super heater” facility // Geophys. Res. Lett., 18(6), 1991, 1035–1038.
- [4] R. C. Moore, U. S. Inan, T. F. Bell, and E. J. Kennedy. ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of ~ 4400 km // J. Geophys. Res., vol. 112, no. A5, p. A05 309, May 2007. DOI: 10.1029/2006JA012063.

- [5] Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Ермак В.М. Удаленная регистрация КНЧ/ОНЧ излучения, вызванного экспериментами по искусственной модификации ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 2015, т. 55, вып. 4, с.466–472
- [6] Eliasson, B., C.-L. Chang and K. Papadopoulos. Generation of ELF and ULF electromagnetic waves by modulated heating of the ionospheric F2 region. *J. Geophys. Res.* 2012 г., Т. 117, A10320.
- [7] Гинзбург В.Л., Гуревич А.В., Нелинейные явления в плазме. – УФН, 1960, т.70, №2, с. 202.
- [8] Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М. Наука, 1973
- [9] D. Bilitza and Reinisch, B., International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, *J. Adv. Space Res.*, 42, #4, 599-609, doi:10.1016/j.asr.2007.07.048, 2008
- [10] MSIS-E90: [http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis\\_vitmo.php](http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php)

## Оглавление диссертации

Введение

Глава 1. Экспериментальные и теоретические исследования воздействия на ионосферу мощным КВ радиоизлучением

- 1.1 История исследований искусственного низкочастотного радиоизлучения, генерируемого в ионосфере в диапазоне 1-10кГц 15
- 1.2 Результаты экспериментальных исследований генерации низкочастотных радиоволн в диапазоне 0.1-30 Гц 27
- 1.3 Теория нагрева ионосферы мощным КВ радиоизлучением 38
- 1.4 Механизм ионосферной генерации магнитных пульсаций в поле мощного высокочастотного передатчика 41
- 1.5 Оценка поля на поверхности земли 45

Глава 2. Методика проведения измерений вариаций магнитного поля в диапазоне 3-30 Гц в экспериментах на стенде СУРА

- 2.1 Аппаратно-программный комплекс регистрации вариаций магнитного поля 49
- 2.2 Контроль за состоянием ионосферы с помощью ионозонда CADI и специализированного приемника GPS/GLONASS Prego-T 61
- 2.3 Методы обработки низкочастотных сигналов 66

Глава 3. Результаты экспериментов по генерации сигналов в диапазоне 3–30 Гц на стенде СУРА

- 3.1 Обнаружение искусственных сигналов на средних широтах в ночное время 70
- 3.2 Зависимость амплитуды низкочастотных сигналов от соотношения рабочей частоты стенда и критической частоты F-слоя ионосферы 72
- 3.3 Зависимость амплитуды исследуемых низкочастотных сигналов от поляризации волны накачки 75
- 3.4 Определение времени распространения низкочастотных сигналов от источника 78
- 3.5 Поляризационные свойства низкочастотных сигналов. 83
- 3.6 Особенности низкочастотных сигналов во время магнитной бури 88
- 3.7 Зависимость амплитуды низкочастотных сигналов от удаления от стенда СУРА. 91
- 3.8 Выводы по главе 3 96

Глава 4. Численный расчет ионосферного источника низкочастотного радиоизлучения

- 4.1 Численное моделирование. Структура ионосферного источника 98
- 4.2 Расчет поля в области источника и о задаче выхода излучения из ионосферы 110
- 4.3 Выводы по главе 4, сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными. 112

Заключение и литература 115