

На правах рукописи



СИДОРЕНКО Антон Евгеньевич

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СНЧ ВОЛН
НА МАЛЫХ И СРЕДНИХ РАССТОЯНИЯХ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Мурманск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении
«Полярный геофизический институт» (ПГИ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
ТЕРЕЩЕНКО Евгений Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
ПОЛЯКОВ Сергей Владимирович
Научно-исследовательский радиофизический
институт федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»

кандидат физико-математических наук
ШЛЮГАЕВ Юрий Владимирович
Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии
наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное военное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Военно-
космическая академия имени А.Ф. Можайского»
Министерства обороны Российской Федерации

Защита состоится «5» октября 2016 г. в 15 час. 00 мин на заседании диссертационного
совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете
им. Н.И. Лобачевского Министерства образования Российской Федерации по адресу:
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского
университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/603>.

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

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



А.В. Клюев

Актуальность работы

Диссертационная работа посвящена исследованию особенностей распространения электромагнитных волн сверхнизкочастотного диапазона (СНЧ, 30-300 Гц) в волноводе Земля-ионосфера в области высоких широт.

Распространение радиоволн сверх- и крайне низких частот (КНЧ, 3-30 Гц) в естественных волноводах, ограниченных поверхностью Земли и ионосферой, исследуется в теоретических и экспериментальных работах многих авторов, и особенно активно – начиная с середины – второй половины XX века, до настоящего времени [1-4]. Первоначальный интерес к этому диапазону частот возник в связи с исследованием закономерностей распространения в приземном волноводе электромагнитных возмущений естественного происхождения. В достаточно завершённом виде классическая теория распространения СНЧ волн в волноводе Земля-ионосфера была наиболее подробно изложена в базовых монографиях [1-2]. С точки зрения распространения волн в горизонтально- и сферически слоистых средах были рассмотрены различные теоретические подходы к описанию проблемы и предложены многочисленные модели и решения, соответствующие реальным условиям распространения, в основном учитывающие различные особенности структуры ионосферы.

В связи с развитием технологических средств, но также и, одновременно, потребностей применения в технике в целях коммуникации, возникла потенциальная практическая возможность создания искусственных контролируемых источников излучения электромагнитных волн СНЧ диапазона. Были опубликованы многочисленные работы, посвященные теоретическим и экспериментальным исследованиям искусственных и естественных КНЧ-СНЧ электромагнитных волн на различных расстояниях в дневных и ночных условиях [5-23]. Исследовались возможности учета ионосферных неоднородностей на распространение СНЧ волн [24-31]. Изучались различные способы моделирования параметров распространения в волноводе как на теоретической основе, так и с привлечением экспериментальных данных [32-39]. Используемая в экспериментах, представленных в настоящей работе, мощная СНЧ радиоустановка на Кольском п-ове применялась в работах ряда авторов, посвященных различным аспектам возбуждения и распространения радиоволн [40-41]. Особенности распространения СНЧ (как и КНЧ) волн в высоких широтах ранее рассматривались в достаточно малом количестве работ [4, 32, 43, 44]. Среди работ последнего времени можно отметить монографию [3], где приводится достаточно подробный обзор существующих классических методов расчета СНЧ полей в волноводе Земля-ионосфера.

С точки зрения физических особенностей СНЧ диапазон частот интересен несколькими основными факторами. Затухание СНЧ радиоволн с расстоянием в волноводном канале Земля-ионосфера крайне мало. Это обеспечивает

возможность передачи сигналов на значительные расстояния. При этом, в отличие от более высокочастотных диапазонов, устойчивость параметров СНЧ волн при различных изменениях состояния ионосферы значительно более высока, что повышает надежность их использования в коммуникации на больших дистанциях от источников – вплоть до антиподных.

Глубина проникновения электромагнитных волн в природные среды, определяемая величиной скин-слоя, в СНЧ диапазоне весьма значительна. На частоте 100 Гц при типичных проводимостях земли 10^{-5} - 10^{-4} См/м скин-слой составляет величину 5-15 км, а для морской воды с удельной проводимостью порядка 10^0 См/м – 25-50 м. Это позволяет использовать радиоволны данного диапазона для глубинных зондирований земной коры [45, 52, 53] и в сейсмическом мониторинге [46, 47], а также для организации связи с погруженными объектами – подводными и подземными [48-51].

Негативные факторы, ограничивающие развитие широкого гражданского применения искусственных СНЧ полей, связаны с технологическими сложностями создания эффективных наземных излучающих установок. Кроме малой обеспечиваемой скорости передачи информации по сравнению с более высокими частотами, эти радиоустановки должны иметь передающие антенны длиной минимум в десятки километров при высокой мощности генераторных устройств, способных создавать в них токи порядка сотен ампер. Для повышения эффективности горизонтальной антенны необходимо располагать ее на поверхности земли, имеющей относительно низкую эффективную удельную проводимость. Кроме того, для успешного приема искусственных СНЧ сигналов требуется также преодолевать трудности, связанные с постоянным присутствием в этой части электромагнитного спектра естественных помех.

В настоящее время известно всего о нескольких СНЧ установках, созданных в прошлые годы и реально применявшихся на практике [8, 45, 49, 51]. Несмотря на основное военное назначение, они задействовались также и для исследовательских работ, связанных как непосредственно с задачами мощного радиостроения, так и с изучением особенностей последующего функционирования этих установок и их непосредственным применением в радиофизических экспериментах с приемом сигналов на больших расстояниях. По этой тематике, начиная с 1970-ых годов, так же было опубликовано большое количество работ [5-11].

Единственной постоянно действующей сегодня является мощная СНЧ радиоустановка на Кольском п-ове [45]. В научных целях она неоднократно применялась в экспериментальных работах российских авторов, посвященных исследованиям возможностей применения искусственных СНЧ полей для электромагнитного зондирования, исследования распространения радиоволн [40, 41], а также для организации сейсмического мониторинга [46].

Кроме этого СНЧ источника следует также упомянуть о комплексных экспериментальных работах серии FENICS [52, 53], имеющих основную заявленную геологическую направленность. В этих работах в качестве антенны использовалась специальная ЛЭП, так же расположенная на Кольском п-ове и генерирующая аппаратура КНЧ-СНЧ диапазона.

Реакция параметров СНЧ поля на состояние внешней среды при распространении в волноводе Земля-ионосфера, а также их достаточная для целей коммуникации устойчивость определяют потенциальный научный и технический интерес к развитию использования данного частотного диапазона. В то же время в имеющейся литературе до сих пор крайне мало систематической информации, посвященной некоторым аспектам распространения СНЧ в приземном волноводе. На наш взгляд, на сегодняшний день исключительно большое внимание исследователей уделено вопросам влияния ионосферы, в то время как роль подстилающей среды, протекающих в ней геологических и сейсмических процессов остается крайне мало исследованной в экспериментах. Несмотря на то, что отчасти это связано с ограниченной технической возможностью генерации СНЧ волн, необходимость развития исследований остается очевидной как в целях зондирования нижней ионосферы и литосферы, так и для радиосвязи и сейсмического мониторинга.

Объектом исследования в работе является распространение радиоволн сверхнизких частот в приземном волноводе Земля – нижняя ионосфера.

Предмет исследования – особенности распространения электромагнитных волн СНЧ диапазона, создаваемых наземным контролируемым источником на высокоширотных трассах в различных гео-гелиофизических условиях на различных расстояниях от источника. Специфика выбранных трасс связана с особенностями авроральной и субавроральной ионосферы как верхней стенки волновода и с влиянием подстилающей среды с низкой эффективной удельной проводимостью, что наблюдается на Балтийском кристаллическом щите, где расположен активный СНЧ источник. Также рассматриваются особенности полей, связанные с геометрическим расположением зоны приема относительно направления излучающей антенны.

Цель диссертационной работы – выполнить теоретические оценки, получить и проанализировать экспериментальные сведения об особенностях структуры и поведения электромагнитного поля СНЧ диапазона в приземном волноводе, обусловленных различными геофизическими факторами и явлениями, а также свойствами среды распространения и геометрическими условиями наблюдений.

Задачи исследования:

1. Выбрать и обосновать теоретические подходы для расчетов электромагнитного поля горизонтального наземного источника СНЧ

диапазона и интерпретации измерений как вблизи источника, так и в волноводе Земля-ионосфера с учетом основных особенностей доступных высокоширотных трасс протяженностью более тысячи километров.

2. Оценить степень чувствительности СНЧ поля вблизи наземного горизонтального излучателя к изменениям состояния ионосферы с целью обоснования способа использования измерений поля в данной зоне для контроля особенностей возбуждения волн в волноводе, а также для моделирования структуры подстилающей среды под источником.
3. Выявить особенности радиальной (продольной) компоненты магнитного поля горизонтального электрического диполя (ГЭД) в приземном волноводе, измерениями которой в предшествующих работах, как правило, пренебрегали; рассмотрение радиальной компоненты поля актуально в настоящей работе ввиду особенности расположения доступных для экспериментов зон на Балтийском кристаллическом щите относительно источника.
4. Рассмотреть влияние низкопроводящей земли на трассе распространения СНЧ волн на амплитуду поля, скорректировать параметры распространения, приводимые в литературе, с целью учета этого влияния и оценить адекватность полученных параметров на основе сравнения с данными измерений.
5. Рассмотреть эффекты масштабных геофизических явлений на возбуждение и распространение СНЧ волн на примерах воздействия солнечно-лунных приливных деформаций земной коры в области источника, а также солнечного затмения, наблюдавшегося в области, охватывающей точку расположения источника излучения и трассы распространения.

Методы исследования

В работе использованы экспериментальные методы исследования распространения радиоволн на основе генерации СНЧ полей искусственной наземной радиоустановкой и прямых магнитометрических измерений амплитуды поля в пространственно разнесенных точках. Для анализа и интерпретации результатов измерений привлечены результаты расчетов распространения СНЧ волн в волноводе Земля-ионосфера в соответствии с современными представлениями.

Научная новизна

Впервые представлены многочисленные примеры и проанализированы результаты наблюдений в течение продолжительного периода времени поведения СНЧ электромагнитного поля, создаваемого наземным контролируемым источником в высокоширотной области при различных геофизических условиях как на расстояниях, сравнимых с высотой ионосферного волновода, так и на расстояниях более тысячи километров.

Рассмотрена роль радиальной компоненты магнитного поля ГЭД в волноводе в определенных областях, измерениям которой ранее в литературе не

уделялось специального внимания. Показана важность учета влияния низкой проводимости земли вдоль трасс распространения СНЧ.

Впервые в СНЧ диапазоне в высоких широтах наблюдался эффект солнечного затмения на распространение радиоволн в приземном волноводе, показывающий ведущую роль солнечной ионизации на высотах нижней ионосферы и качественно сводящийся к возрастанию высоты эффективного волновода при резком падении освещенности.

Научная значимость

Полученные результаты расширяют и дополняют современные экспериментальные сведения об особенностях распространения СНЧ радиоволн в волноводе Земля-ионосфера; показывают важность учета конкретных условий среды в области источника и вдоль трассы распространения для расчетов полей и интерпретации данных натурных наблюдений в приземном волноводе. Показывают потенциальные возможности использования контролируемых СНЧ полей для зондирования природных сред.

Практическая значимость полученных результатов

Предложен способ контроля особенностей возбуждения поля в волноводе (одновременно – дипольного электрического момента источника и частотной зависимости проводимости земли под источником), основанный на использовании результатов синхронных измерений поля на расстояниях, не превышающих высоты эффективного волновода, продемонстрированный в условиях эксперимента [А9].

Показано [А8], что СНЧ поле в волноводе сохраняет достаточную для применения в коммуникации стабильность параметров, даже во время масштабных возмущений ионосферы на примере прохождения лунной тени через трассу распространения во время полного солнечного затмения 20 марта 2015 г.

Степень достоверности результатов

Исключительно слабая чувствительность СНЧ поля к состоянию ионосферы на расстояниях от источника, сопоставимых с высотой эффективного волновода, показана на многочисленных примерах измерений магнитного поля в данной зоне, относящихся к периоду 2006-2015 г.г. – т.е. в различных фазах солнечной активности, а также в различные времена года и время суток.

Модельные параметры двухслойной структуры земли, полученные из сопоставления результатов измерений поля вблизи источника с теоретическими расчетами без учета влияния ионосферы, а также параметры распространения СНЧ волн, скорректированные на основе данных об усредненном характере проводимости земли вдоль трассы Кольский п-ов – Петрозаводск – Сторожно, обеспечивают более точное согласие расчетов СНЧ

поля по сравнению с использованием типичных параметров [13] и эффективной проводимости земли под источником, не зависящей от частоты.

Вариации поверхностного импеданса земли под источником, наблюдавшиеся в течение 30-суточного мониторинга, отражают медленные периодические вариации деформаций земной коры вследствие приливных гравитационных эффектов.

Вариации магнитного поля СНЧ источника в волноводе во время прохождения через трассы области солнечного затмения хорошо согласуются с изменениями солнечной освещенности, несмотря на наличие в авроральной области фактора корпускулярной ионизации высокоэнергичными частицами. Вблизи источника поле не испытывает влияния масштабного и резко протекающего ионосферного процесса.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические расчеты СНЧ поля ГЭД и экспериментальные измерения поля на расстояниях, сравнимых с высотой эффективного волновода, согласованно показывают возможность пренебрежения влиянием ионосферы на поле в данной зоне [А3, А7, А8];
2. Указанная зона одновременно является наиболее благоприятной для определения частотной зависимости поверхностного импеданса и эффективной проводимости земли в окрестности источника по измерениям поля ГЭД, свободным от влияния ионосферы [А9, А19];
3. На основе измерений поля ГЭД на расстояниях порядка высоты эффективного волновода предлагается способ синхронного контроля особенностей возбуждения СНЧ волн в волноводе [А7, А9];
4. Часто используемое представление СНЧ магнитного поля ГЭД в волноводе в виде единственной азимутальной (поперечной) компоненты требует обоснования при приближении к направлению вкрест к антенне источника, в особенности на расстояниях менее 1000 км. В указанных областях возрастает значимость радиальной составляющей магнитного поля вплоть до перехода ее в основную компоненту поля, что следует учитывать при интерпретации результатов измерений и в гониометрических задачах [А7, А9];
5. Наряду с контролем особенностей возбуждения, учет вклада импеданса земли в параметры распространения волн в волноводе при низкой эффективной проводимости необходим для достижения более точного соответствия результатов теоретических расчетов полей измеренным значениям [А9];
6. Наблюдаемые вариации поверхностного импеданса поля горизонтального наземного источника на расстояниях, сравнимых с высотой волновода, согласуются с медленными деформациями земной коры вследствие

- приливных гравитационных эффектов и могут объясняться перераспределением электропроводящих флюидов в ее толще [А7];
7. Основной эффект солнечного затмения 20.03.2015 на распространение СНЧ волн в авроральных областях, подверженных в том числе и корпускулярной ионизации в нижней ионосфере, связан главным образом с увеличением эффективной высоты волновода при резком уменьшении потока солнечной радиации, что приводит к практически синхронному падению амплитуды регистрируемого поля на величину до 10-15% [А9].

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы были представлены устными докладами на научных конференциях и опубликованы в изданиях Трудов конференций: на научной конференции «Состояние и перспективы развития геофизических исследований в высоких широтах», г. Апатиты, 2010 г.; на XVI региональной Конференции по распространению радиоволн, г. С.-Петербург, 2010 г.; на II Международной нобелевской научной конференции «Инновационные электромагнитные методы геофизики», г. Салехард, 2010 г.; на Научной конференции – школе молодых ученых «Высокоширотные геофизические исследования», г. Мурманск, 2011 г., 2015 г.; на XXVII Всероссийском симпозиуме по радиолокационным исследованиям природных сред, г. С.-Петербург, ВКА им. Можайского, 2011 г.; на XXIII Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, в г. Йошкар-Ола, 2011 г.; на VI Всероссийской школе-семинаре имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли, г. Новосибирск, 2013 г.; на XXIV Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, Иркутск, 2014 г.; на XXIX Всероссийском симпозиуме по радиолокационному зондированию природных сред, С.-Петербург, ВКА им. Можайского, 2015 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 работе. Из них 10 – в рецензируемых журналах, 11 – публикации в сборниках трудов и докладов всероссийских и региональных научных конференций.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие во всех экспериментальных работах, представленных в диссертации. Участвовал в обсуждении и выборе условий исследований, в постановке задач и в проведении измерений. Проводил обработку и последующую интерпретацию полученных данных. Выполнял теоретические расчеты и оценки, создавал необходимые для этого компьютерные программы. Проводил поиск и анализ опубликованных работ по тематике исследований.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю – д.ф.-м.н. Терещенко Е.Д. за существенную помощь и консультации при подготовке работы, а также за значительную роль в организации и проведении рассматриваемых исследований. Выражаю благодарность В.Ф. Григорьеву (ПГИ) за обеспечение экспериментов, а также инженерам и научным сотрудникам лаборатории радиопросвечивания №401 ПГИ, принимавшим активное участие в экспериментальных работах. За создание и модернизацию измерительного оборудования выражаю благодарность к.ф.м.-н. Ю.В. Федоренко и сотрудникам возглавляемого им сектора №302 ПГИ.

Структура и объем работы

Работа состоит из Введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. В тексте содержится 40 рисунков, 6 таблиц и список из 100 библиографических наименований. Общий объем диссертации – 121 страница.

Содержание работы

Введение представляет обзор современного состояния научной проблемы распространения СНЧ волн на основе анализа основных предшествующих работ. Обосновывается актуальность рассматриваемой темы исследования, формулируются цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту. Кратко излагается основное содержание работы.

В **первой главе** приводится и обсуждается базовый теоретический аппарат, представляющий собой основные расчетные формулы и некоторые используемые приближения, а также выполняются необходимые в дальнейшем аналитические оценки. **Раздел 1.1** посвящен представлению исходных формул, описывающих СНЧ горизонтального электрического диполя (ГЭД) в сферическом волноводе Земля-ионосфера, а также определению входящих в них параметров. В **разделе 1.2** вводится приближение волновода с малой кривизной и даются расчетные формулы для поля в таком волноводе в виде из оригинальных работ Bannister и Casey. В **разделе 1.3** рассматриваются расчеты поля в виде разложения по модам сферического волновода, по приближенным формулам из раздела 1.2 и по формулам для поля диполя на поверхности плоской земли без учета ионосферы с целью исследовать возможность и оценить условия пренебрежения влиянием ионосферы на поле ГЭД на дистанциях, сравнимых с высотой эффективного волновода. Кроме того это позволило уточнить границы применимости формул Bannister/Casey на малых расстояниях, поскольку ранее оценки корректности были выполнены только для идеально отражающей земли. Сопоставляются особенности поведения продольной и поперечной составляющих горизонтального магнитного поля. Делается вывод о том, что радиальная (продольная) компонента поля позволяет не учитывать влияния ионосферы в большем диапазоне расстояний. В **разделах 1.4 и 1.5**

представлены формулы, выражающие строгое решение задачи о поле горизонтальной заземленной линии на поверхности плоской однородной и двухслойной земли, необходимые впоследствии для расчетов полей на расстояниях, где поле СНЧ источника свободно от влияния ионосферы. В **разделе 1.6** на основании выполненных расчетов полей для условий, близких к реальным натурным экспериментам на Кольском п-ове, для всего СНЧ диапазона оценены минимальные необходимые расстояния от источника, где выполняются приближенные условия Леонтовича, на корректности которых основывается метод определения эффективной проводимости по значениям поверхностного импеданса земли, аналогично тому, что используется при магнитотеллурическом зондировании. Отмечается, что найденная зона имеет пересечение с областью, где также можно пренебрегать и влиянием ионосферы на поле ГЭД. Таким образом, вблизи источника выделяется зона, наиболее благоприятная для осуществления контроля за особенностями возбуждения по измерениям его горизонтального магнитного поля, а также моделирования по ним двухслойной структуры подстилающей земли на основании расчетов по формулам раздела 1.5.

Содержание **второй главы** диссертации суммирует основные результаты проведенных в период 2006-2015 г.г. экспериментальных исследований особенностей возбуждения и распространения СНЧ волн с использованием контролируемой наземной радиоустановки на Кольском п-ове. **Раздел 2.1** на многочисленных примерах измерений СНЧ магнитного поля, проведенных в разные фазы солнечной активности, в разное время суток и в разные времена года в обл. Ловозеро, подтверждают представленные ранее теоретические оценки о возможности пренебрежения влиянием ионосферы на расстояниях, сравнимых с высотой эффективного волновода. На основании полученного массива результатов измерений магнитного поля в ближней зоне в диапазоне частот 30-200 Гц, а также расчетов поля заземленной линии на поверхности двухслойной среды, моделируется адекватная структура подстилающей земли в области источника для ее последующего использования в расчетах поля в волноводе. В заключение дается краткий обзор имеющихся результатов измерений искусственных КНЧ полей в обл. Ловозеро при той же геометрии задачи, что использовалась в СНЧ экспериментах. Приводимые результаты показывают наличие существенных вариаций частотной зависимости амплитуды в экспериментах, проведенных в разные времена года и время суток, что качественно резко отличается от свойств СНЧ полей и может быть потенциально использовано для квазивертикального зондирования ионосферы. **Раздел 2.2** посвящен исследованиям особенностей радиальной компоненты магнитного поля ГЭД в волноводе, наблюдавшихся в экспериментах на субавроральных трассах протяженностью 750-900 км в специфических условиях низкой проводимости Балтийского кристаллического щита. Как показал анализ опубликованных ранее работ, вкладом радиальной компоненты поля очень часто пренебрегают без

выполнения подтверждающих корректность этого подхода оценок. Тем не менее, в волноводе существуют узкие области, примыкающие к направлению вкрест к антенне, в которых ввиду стремления азимутального угла места φ к $\pi/2$ радиальная компонента становится значимой или даже основной. Такие области определены в работе расчетным путем и приводятся на диаграммах. В областях, где в эксперименте удается достаточно надежно зарегистрировать как продольную, так и поперечную компоненты магнитного поля ГЭД, существует возможность косвенного определения фазовой скорости распространения волны в приземном волноводе на основе отношения их измеренных амплитуд. Далее рассматривается роль низкопроводящей земли – нижней стенки волновода в формировании специфических условий распространения СНЧ волн, в то время как в большинстве работ земля в СНЧ диапазоне рассматривается как идеальный проводник. С учетом вклада поверхностного импеданса земли выполнена коррекция параметров распространения СНЧ относительно типичных литературных данных. Привлечение данных электроразведки об усредненных свойствах земли вдоль трассы распространения, а также учет особенностей возбуждения (конкретного вида частотной зависимости эффективной проводимости земли под источником) позволил достичь хорошего согласия расчетов с измерениями.

Заключительная, **третья, глава** основной части работы содержит изложение двух примеров экспериментальных наблюдений естественных геофизических явлений с применением СНЧ полей контролируемого источника. В первом эксперименте был осуществлен мониторинг поведения электромагнитного поля и поверхностного импеданса земли на частоте 82 Гц на дистанции от источника, сравнимом с высотой ионосферы – в обл. Ловозеро, направленный на исследование эффекта приливных деформаций земной коры. Во время практически 30-суточных непрерывных наблюдений были успешно выделены слабые (менее 1%) медленные вариации импеданса, соответствующие вариациям вертикального смещения земной коры под действием гравитационных сил системы Луна-Солнце. Не удалось выделить быструю (суточную) периодическую составляющую этого процесса, чему, по нашему мнению, препятствуют вариации ионосферы вследствие изменения освещенности Солнцем, а также случайные ионосферные возмущения, маскирующие слабые искомые эффекты. Во втором эксперименте исследовался эффект полного солнечного затмения 20 марта 2015 г. на распространение СНЧ волн на авроральных и субавроральных трассах распространения Кольский п-ов – арх. Шпицберген и Кольский п-ов – Петрозаводск. В трех пунктах измерений при изменениях солнечной освещенности трасс вследствие набегания лунной тени наблюдалось одновременное соответствующее по характеру изменение амплитуды поля СНЧ источника на частоте 82 Гц. Эффект солнечного затмения на распространение радиоволн низких частот ранее исследовался только в СДВ

диапазоне и впервые наблюдался в нашей работе. Также ранее отсутствовали аналогичные работы в высоких широтах, где присутствует дополнительный фактор корпускулярной ионизации нижней ионосферы (на высотах ниже 100 км) высокоэнергичными частицами. Предварительный анализ и моделирование складывающихся при затмении условий в нижней ионосфере, кратковременно стремящихся к ночным, показал, что наблюдаемые вариации амплитуды поля объясняются увеличением эффективной высоты отражения СНЧ волн в приземном волноводе аналогично тому, что наблюдалось ранее для волн СДВ диапазона, так же чувствительных к свойствам нижней ионосферы.

В заключении приведены основные результаты диссертации:

1. Обоснован выбор базовых теоретических формул для расчетов СНЧ электромагнитного поля ГЭД, используемых в работе при расстояниях как вблизи источника, так и в волноводе Земля-ионосфера на дистанциях более тысячи километров.
2. Показана возможность пренебрежения влиянием ионосферы на горизонтальное СНЧ поле ГЭД на расстояниях, сравнимых с эффективной высотой волновода.
3. Рассмотрены особенности радиальной компоненты магнитного поля ГЭД в приземном волноводе, установлены области, в которых нельзя пренебрегать ее величиной – прилегающие к направлению вкрест к антенне.
4. Показана важность учета влияния низкопроводящей земли на трассе распространения на параметры распространения СНЧ и выполнена коррекция типичных параметров из литературы для учета эффекта конечной средней проводимости Балтийского кристаллического щита. Это, наряду с учетом частотных особенностей возбуждения, определяемых поведением эффективной проводимости земли под источником, позволило достичь хорошего соответствия расчетов поля с результатами измерений во всем рабочем диапазоне частот в эксперименте.
5. Рассмотрены эффекты масштабных геофизических явлений на возбуждение и распространение СНЧ волн на примерах воздействия солнечно-лунных приливных деформаций земной коры в области источника, а также эффекта солнечного затмения 20 марта 2015 г., наблюдавшегося в области, охватывающей как точку расположения источника излучения, так и трассы распространения.

Список работ по теме диссертации

- A1.** Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Васильев А.Н., Собчаков Л.А., Васильев А.В. Особенности частотной зависимости горизонтальных компонент магнитного поля в ультра- и сверхнизкочастотном диапазоне // Письма в ЖТФ. 2005. Т.31. №14. С.30-33.
- A2.** Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е., Миличенко А.Н., Мольков А.В., Собчаков Л.А., Васильев А.В. О возможности квазивертикального радиозондирования ионосферы в крайне низкочастотном диапазоне // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2007. – Т.85, -вып.8. -С.471-473.
- A3.** Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е., Миличенко А.Н., Собчаков Л.А., Васильев А.В. Влияние ионосферы на электромагнитные волны от наземного излучателя в диапазоне частот 1-10 Гц // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т.47, №6. -С.1-2.
- A4.** Терещенко Е. Д., Иванов Н. В., Сидоренко А. Е., Григорьев В. Ф. Исследование особенностей распространения искусственного электромагнитного сигнала в диапазоне 0,1–10 Гц в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т.50, №5. – С.660-670.
- A5.** Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Жамалетдинов А.А. Структура КНЧ поля, отраженного от ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т.50, №5. – С.683-688.
- A6.** Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф. Вариации электромагнитного поля искусственного источника СНЧ-диапазона в переходной зоне // Вестник КНЦ РАН. – 2012, №2(9), С.3-8.
- A7.** Терещенко Е.Д., Полуянов С.В., Григорьев В.Ф., Терещенко П.Е., Сидоренко А.Е.. Изменения фазы магнитного поля в СНЧ-диапазоне на разломной тектонике // Физика Земли. 2012. №9-10. С.96-102
- A8.** Терещенко Е.Д., А.Е.Сидоренко, В.Ф.Григорьев. Влияние приливных эффектов на электромагнитное поле искусственного источника СНЧ-диапазона на балтийском кристаллическом щите // Физика Земли. – 2014. –№1. – С.114-119.
- A9.** E. D. Tereshchenko, A. E. Sidorenko, P. E. Tereshchenko, V. F. Grigoriev. Effect of the total solar eclipse of 20 March 2015 on the ELF propagation over high-latitude paths // Geophys. Res. Lett., Volume 42, Issue 17, 6899–6905.
- A10.** Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Терещенко П.Е.. Радиальная компонента СНЧ магнитного поля горизонтального электрического диполя при низкой проводимости земли на трассе распространения. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. №1. С.15-24.

- A11.** Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Иванов Н.В., Григорьев В.Ф. Особенности вариаций электрического и магнитного полей искусственного источника СНЧ-диапазона // Научная конференция «Состояние и перспективы развития геофизических исследований в высоких широтах», (г.Апатиты, 16-17 сентября 2010г.) / отв. ред. д.ф.-м. наук В.Г.Воробьев, тех. ред. Н.В.Голубцова. – Мурманск-Апатиты: ПГИ КНЦ РАН, 2010. – С.87-88.
- A12.** Tereshchenko E.D., Sidorenko A.E., Ivanov N.V., Grigoryev V.F., Zhamaletdinov A.A. Features of artificial ELF electromagnetic waves propagation in high latitude areas // Physics of Auroral Phenomena: abst. of the 33rd Annual Seminar (Apatity, 2-5 March 2010). – Preprint PGI-10-01-126. - Apatity: PGI KSC RAS, 2010. – P.69.
- A13.** Терещенко Е.Д., Иванов Н.В., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф. Исследование особенностей искусственного электромагнитного сигнала в диапазоне 0.1-10 Гц в высоких широтах // Труды региональной XVI конференции по распространению радиоволн. Санкт-Петербург, 9-11 ноября 2010 г. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2010. – С. 57-60. ISBN 978-5-98340-241-6.
- A14.** Терещенко Е.Д., Иванов Н.В., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф. Особенности распространения в высоких широтах электромагнитного поля в диапазоне частот 0,1-10 Гц // Инновационные электромагнитные методы геофизики: II Международная Нобелевская научная конференция: труды конф., (Салехард, 25-28 августа 2010 г.) / Национальный (Российский) фонд Наследия Нобелей. - Салехард, 2010.
- A15.** Сидоренко А.Е. Вариации горизонтального магнитного поля искусственного СНЧ источника в переходной зоне // Высокоширотные геофизические исследования: тез. науч. конф., (Мурманск, 6-7 октября 2011). – Мурманск: ПГИ КНЦ РАН, 2011. – С.33-35.
- A16.** Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф. Регулярные вариации искусственного СНЧ электромагнитного поля в переходной зоне // Распространение радиоволн: XXIII Всероссийская конференция, (Йошкар-Ола, 23-26 мая, 2011г.): сб. докл. В 3-х т. - Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. - Т.1. - С.271-274.
- A17.** Tereshchenko E.D., Sidorenko A.E., Grigoryev V.F. Variations of the artificial ELF electromagnetic field in the transition zone / // Physics of Auroral Phenomena: abst. of the 34rd Annual Seminar (Apatity, 1-4 March 2011). – Preprint PGI-11-01-127. - Apatity: PGI KSC RAS, 2011. – P.52.
- A18.** Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф. Приливные вариации электромагнитного поля искусственного СНЧ-излучателя на балтийском кристаллическом щите // Материалы VI Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по

электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013, 2-7 сентября 2013 г., Новосибирск, Академгородок [Электронное издание] / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. – Новосибирск : ИНГГ СО РАН, 2013. – Режим доступа: <http://ems2013.ipgg.sbras.ru>, свободный.

- A19.** А.Е.Сидоренко, Е.Д. Терещенко, П.Е.Терещенко, В.Ф.Григорьев. Распространение электромагнитного поля СНЧ-диапазона в субавроральной зоне // Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», (Санкт-Петербург, 16-17 апреля 2014г.) /под общ. ред. М.М.Пенькова. - В 2-х т. - СПб.: ВКА им.А.Ф.Можайского, 2014. - Т.2. - С.132-138.
- A20.** А.Е.Сидоренко, Е.Д. Терещенко, П.Е.Терещенко, В.Ф.Григорьев. Особенности распространения электромагнитных волн СНЧ-диапазона на субавроральной трассе // Распространение радиоволн РРВ-24: труды XXIV всероссийской научной конференции, (Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014). – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. – Т.2. - С.259-262.
- A21.** А.Е.Sidorenko, Е.D. Tereshchenko, P.E.Tereshchenko, V.Grigoriev. Features of ELF waves propagation along the subauroral and midlatitude paths // Physics of Auroral Phenomena: abst. of the 37th Annual Seminar (Apatity, 25-28 February 2014). – Preprint PGI-14-01-130. - Apatity: PGI KSC RAS, 2014.-P.34.

Цитированная литература

1. Wait J.R. Electromagnetic Waves in Stratified Media. Oxford: Pergamon Press, 1970.
2. Galejs J. Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves. Oxford: Pergamon Press, 1972.
3. Pan W. and Li K. Propagation of SLF/ELF Electromagnetic Waves. Heidelberg: Springer, 2013.
4. R. D. Hunsucker and J. K. Hargreaves, The high-latitude ionosphere and its effect on radio propagation. Cambridge University Press. 2003.
5. Bannister P.R., Wolkoff E.A., Katan J.R. and Williams F.J., Far-field, extremely-low-frequency propagation measurements 1, 4 March to 9 April 1971. Radio Science, Volume 8, Number 7, pages 623-631, July 1973.
6. Bannister P.R., Far-Field Extremely Low Frequency (ELF) Propagation Measurements, 1970-1972. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-22, No. 4, 1974.
7. Bannister, P. R., Variations in extremely low frequency propagation parameters, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 37, 1203–1210, 1975.

8. Bannister P.R., Williams, Dahlvig, and Kraimer, Wisconsin Test Facility Transmittng Antenna Pattern and Steering Measurements. IEEE Transactions on Communications, V. COM-22, No. 4, 1974.
9. Bannister, P. R., Some notes on ELF Earth-ionosphere waveguide daytime propagation parameters, IEEE Trans. Antennas Propag., AP-27, 696–698, 1979.
10. Bannister P.R., ELF Propagation Update. IEEE Journal of Oceanic Engineering, V. OE-9, No. 3, 1984.
11. Bannister P.R., Summary of ELF Propagation Validation System FieldStrength Measurements, 1976 to 1978. IEEE Journal of Oceanic Engineering, V. OE-9, NO. 3, 1984.
12. Bannister, P. R., The determination of representative ionospheric conductivity parameters for ELF propagation in the Earth-ionosphere waveguide, Radio Sci., 20, 977–984, 1985.
13. Bannister P.R., Simplified formulas for ELF propagation at shorter distances. Radio Science Volume 21, Number 3, Pages 529-537, M ay-June 1986.
14. Bannister, P. R., ELF propagation highlights, AGARD Conf. Proc., 529, 2-1–2-15, 1993.
15. Bannister P.R., Further examples of seasonal variations of ELF radio propagation parameters. Radio Science Volume 34, Issue 1, January-February 1999, Pages 199–208.
16. Behroozi-Toosi, A. B., Booker H. G., Application of a simplified theory of ELF propagation to a simplified worldwide model of the ionosphere, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 42, 943–974, 1980.
17. Booker, H. G., A simplified theory of ELF propagation in the Earth-ionosphere transmission line, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 42, 929–941, 1980.
18. Burrows, M. L., ELF Communication Antennas, Peter Peregrinus, London, 1978.
19. Fraser-Smith, A. C., Bannister P. R., Reception of ELF signals at antipodal distances, Radio Sci., 33, 83–88, 1998.
20. Davis J.R., The Influence of Certain Ionospheric Phenomena Frequency (ELF) Propagation. IEEE Transactions on Communications, V. COM-22, No. 4, 1974.
21. Ginsberg L.H., Extremely Low Frequency (ELF) Propagation Measurements Along a 4900-km Path. IEEE Transactions on Communications, V. COM-22, No. 4, 1974.
22. Barr R., Jones D.L. and Rodger C.J., ELF and VLF radio waves. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62 (2000) 1689-1718.
23. Fraser-Smith A.C., Reception of ELF signals at antipodal distances. Radio Science, Volume 33, Number 1, Pages 83-88, January-February 1998
24. Field E. C. and Joiner R. G., Effects of lateral ionospheric gradients on ELF propagation. RS, Volume 17, Issue 3, May-June 1982, Pages 693–700.

25. Shellman C.H., A model for propagation of ELF waves throughout the lateral extent of the inhomogeneous Earth-ionosphere waveguide, *Radio Science*, 1989, 24, 1, 35.
26. Richard A. Pappert, ELF scattering in the Earth-ionosphere waveguide, *Radio Science*, 1989, 24, 5, 629.
27. Katan J. R., P. R. Bannister, Summary of ELF propagation variations at mid and high latitudes during the November/December 1982 and February 1984 solar proton events, *Radio Science*, 1987, 22, 1, 111.
28. Pappert R.A., Broadside excitation of ELF by a horizontal dipole beneath a sporadic E environment: Theory, *Radio Science*, 1986, 21, 1, 106.
29. Pappert R.A., Calculated effects of traveling sporadic E on nocturnal ELF propagation: Comparison with measurement, *Radio Science*, 1985, 20, 2, 229.
30. Field E.C., C. R. Warber, R. G. Joiner, Focusing and shadowing of ELF signals, *Radio Science*, 1986, 21, 3, 511.
31. Николаенко А.П. Рассеяние СНЧ радиоволн глобальными неоднородностями полости Земля-ионосфера.// Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т.29. №1. С. 33-40.
32. Greifinger C. and Greifinger P., On the ionospheric parameters which govern high-latitude ELF propagation in the Earth-ionosphere waveguide. *Radio Science*, Volume 14, Number 5, pages 889-895, September-October 1979.
33. Greifinger C. and Greifinger P., Approximate method for determining ELF eigenvalues in the earth-ionosphere waveguide. *RS*. Volume 13, Issue 5, September-October 1978, Pages 831–837.
34. Greifinger C. and Greifinger P., Noniterative procedure for calculating ELF mode constants in the anisotropic earth-ionosphere waveguide. *Radio Science*, Volume 21, Number 6, Pages 981-990, November-December, 1986.
35. Greifinger P.S., Mushtak V.C., and Williams E. R., On modeling the lower characteristic ELF altitude from aeronautical data. *RADIO SCIENCE*, VOL. 42, RS2S12, doi:10.1029/2006RS003500, 2007.
36. Mushtak V.C., Williams E.R., An improved Lorentzian technique for evaluating resonance characteristics of the Earth-ionosphere cavity, *Atmospheric Research*, 2009, 91, 2-4, 188.
37. Кириллов В.В. К модели распространения радиоволн диапазона СНЧ и СДВ в волноводном канале Земля-ионосфера.// Проблемы дифракции и распространения волн. Л.: ЛГУ. 1972. Вып.11. С.120-128.
38. Кириллов В.В. Параметры волновода Земля-ионосфера в диапазоне СНЧ.// Проблемы дифракции и распространения волн. С-Пб.: С-ПбГУ. 1993. Вып.25. С. 35-53.
39. Кириллов В.В., Копейкин В.Н., Муштак В.К. Электромагнитные волны СНЧ-диапазона в волноводном канале Земля-ионосфера.// Геомагнетизм и Аэрномия. 1997. Т.37. №3. С. 114-120.

40. Сараев А.К., Косткин П.М. Структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Вопросы геофизики. 1998. Вып. 35. С. 117-135.
41. Ю.Б.Башкуев, В.Б.Хаптанов, А.В.Ханхараев, Анализ условий распространения СНЧ радиоволн на трассе "Зевс" – Забайкалье.
42. Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н., Исаев С.В., Якунин М.Н., Собчаков Л.А., Васильев А.В., Астахова Н.Л., Владимиров Д.Н., Волосевич В.С., Протопопов Л.Н., Гордюшкин С.М., Савицкий А.П., Редько Г.В., Елисеев А.А., Федоров А.Б., Ратников К.Д., Первые эксперименты по генерации и приёму искусственных УНЧ излучений (0,3-12 гц) на дистанции 1500 км. Изв.вузов.Радиофизика, 45,2,2002,151-162.
43. Ермакова Е. Н., Котик Д. ., Собчаков Л. ., Поляков С. В., Васильев А. В., Бёзингер Т., Белова Н. И. Экспериментальные исследования сигналов в диапазоне 0.6 -4.2 Гц // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т.47, №8. С.621-628.
44. Fraser-Smith, A. C., and J. P. Turtle, "ELF/VLF Radio Noise Measurements at High Latitudes during Solar Particle Events," paper presented at the 51st AGARD-EPP Specialists' Meeting on "ELF/VLF/LF Radio Propagation and Systems Aspects," Brussels, Belgium, 28 September - 2 October, 1992. Published in AGARD Conference Proceedings No. 529, pp. 16-1 to 16-8, May 1993.
45. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А, Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов АН., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ диапазона. // Доклады Академии Наук. Т. 338, №1, С. 106-109, 1994.
46. Сараев А.К., Пертель М.И., Парфентьев П.А. Экспериментальные исследования электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки для целей мониторинга сейсмической активности на Северном Кавказе // Изв. РАН. Физика Земли. 1999. Вып. 2. С. 17-24.
47. Сараев А.К., Пертель М.И., Кочеров А.Б., Косткин П.М., Харламов М.М., Гуозе Чжао, Джи Денг, Джунменг Чжао, Джиюн Ванг. Оценка возможностей геофизического использования сигналов российской СНЧ-радиоустановки «Зевс» в Китае // Вопросы геофизики. Вып. 36. СПб., 2004 – (Ученые записки СПбГУ; №434), 102-108.
48. Кононов Ю.М., Жамалетдинов А.А. Системы СНЧ-радиосвязи и мониторинга среды: перспективное направление конверсионной политики России // ИНФОРМОСТ - Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2002. № 3(21). С. 4–6.
49. Wait, J.R., Editor (1974), Special Issues on ELF communication, IEEE Trans., vol. COM-22, no. 4, 353-588, April.

50. Chang D. C. and Wait J. R., "Extremely low frequency (ELF) propagation along a horizontal wire located above or buried in the earth," IEEE Trans. Commun., vol. COM-22, pp. 421–426, 1974.
51. Wait J. R., Propagation of ELF Electromagnetic Waves and Project Sanguine / Seafarer. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. OE-2, no. 2, April 1977, pgs. 161-172.
52. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Короткова Т.Г., Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Петрищев М.С., Ефимов Б.В., Баранник М.Б., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Смирнов М.Ю., Вагин С.А., Пертель М.И., Терещенко Е.Д., Васильев А.Н., Григорьев В.Ф., Гохберг М.Б., Трофимчик В.И., Ямпольский Ю.М., Колосков А.В., Федоров А.В., Корья Т. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент FENICS). Физика Земли. 2011. № 1. С. 4–26.
53. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Квазитрехмерная модель электропроводности литосферы Фенноскандинавского щита по результатам экспериментов BEAR и FENICS // Доклады Академии наук. - 2015. - Т. 463, № 3, июль. - С. 337-342

Оглавление работы

| | |
|---|----|
| Введение..... | 3 |
| Глава 1. Обоснование использования базовых формул для интерпретации результатов измерений | 15 |
| 1.1. Расчет поля горизонтального электрического СНЧ диполя в волноводе Земля-ионосфера | 16 |
| 1.2. Расчет СНЧ поля ГЭД в волноводе с малой кривизной | 19 |
| 1.3. Оценка влияния ионосферы на поле СНЧ диапазона вблизи источника | 27 |
| 1.4. Строгое решение задачи о поле горизонтальной заземленной линии на поверхности плоской однородной земли..... | 29 |
| 1.5. Поле горизонтальной заземленной линии на поверхности двухслойной горизонтально-слоистой земли | 31 |
| 1.6. Поверхностный импеданс электромагнитного поля на малых расстояниях от источника | 33 |
| Выводы по главе 1..... | 36 |
| Глава 2. Экспериментальные исследования особенностей возбуждения и распространения СНЧ радиоволн в волноводе Земля-ионосфера..... | 39 |
| 2.1. Поля контролируемого источника на расстояниях, сравнимых с высотой ионосферы | 41 |
| 2.1.1. СНЧ поля вблизи источника при различных геофизических условиях | 43 |
| 2.1.2. Построение адекватной модели двухслойной земли под источником на основе результатов измерений магнитного поля в ближней зоне в диапазоне частот 30-200 Гц..... | 54 |
| 2.1.3. Наблюдение вариаций СНЧ полей в ближней зоне источника..... | 59 |
| 2.2. Особенности поведения радиальной компоненты магнитного поля СНЧ диапазона на субавроральных трассах протяженностью 750-900 км | 62 |

| | |
|---|-----|
| 2.2.1. Роль радиальной компоненты магнитного поля в волноводе | 62 |
| 2.2.2. Описание экспериментальных измерений | 65 |
| 2.2.3. Коррекция параметров распространения СНЧ волн при низкой проводимости Земли на трассе | 67 |
| 2.2.4. Анализ результатов эксперимента | 71 |
| Выводы по главе 2..... | 72 |
| Глава 3. Наблюдения геофизических явлений с применением полей контролируемого источника СНЧ диапазона..... | 75 |
| 3.1. Влияние приливных эффектов на электромагнитное поле искусственного источника СНЧ-диапазона на Балтийском кристаллическом щите..... | 78 |
| 3.2. Влияние солнечного затмения 20 марта 2015 г. на распространение СНЧ радиоволн на высокоширотных трассах..... | 91 |
| Выводы по главе 3..... | 103 |
| Заключение..... | 105 |
| Литература | 109 |

Подписано к печати __.____.2016 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать Цифровая. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1. Заказ № _____. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ООО «КаэМ»
Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана 17А