

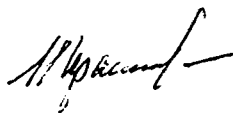
0-792293

*На правах рукописи*

**КРАШЕНИННИКОВ Игорь Васильевич**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
РАДИОВОЛН НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ  
МНОГОЧАСТОТНОГО НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ  
ИОНОСФЕРЫ**

01.04.03 - радиофизика



Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Троицк – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Научный консультант: доктор физико-математических наук  
Попов Алексей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Куницын Вячеслав Евгеньевич

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Денисенко Павел Федорович

доктор физико-математических наук,  
доцент  
Шерстюков Олег Николаевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения РАН

Защита диссертации состоится «28» февраля 2012 г. в 14<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 при Учреждении Российской академии наук Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН по адресу: 142190, г. Троицк Московской области, ИЗМИРАН.  
(проезд автобусом №398 от станции метро «Теплый стан» по маршруту «ИЗМИРАН»).


С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН

Автореферат разослан «12» января 2012 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000690033

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.237.01,  Михайлов Ю.М.  
д. ф.-м. н., профессор

## Общая характеристика работы

История научного направления - ионосферного распространения радиоволн,- берет свое начало с 12 декабря 1901 г., когда Гульельмо Маркони (Guglielmo Marconi) был проведен эксперимент по передаче телеграфного сообщения, состоящего всего лишь из одной буквы "S", между Англией и Ньюфаундлендом (Канада). Принципиальным отличием от предшествующих опытов по беспроводной передаче сигналов, на основе принципов, заложенных Герцем, одним из основоположников которых являлся и русский ученый А.С.Попов, являлось расстояние между конечными пунктами, превышающее 3000 км. Другой отличительной чертой полученных результатов являлась явно выраженная нестабильность передачи сообщений - они успешно передавались только в ночных условиях, да и то не всегда. Эти свойства были подтверждены в экспериментах 1902 г. с приемным устройством, установленным на лайнере "Филадельфия" в трансатлантическом рейсе, в которых было показано, что в дневных условиях можно было принимать сообщения до расстояний ~ 1000 км, а в ночных - до ~ 3000 км [Maslin, 1987].

Следствием эксперимента 1901 г. и попыток его объяснения на основе механизмов дифракции и распространения поверхностной волны привели к тому, что в 1902 г. Хевисайд (Англия) и Кеннелли (США) выдвинули гипотезу о существовании проводящего слоя в верхних слоях земной атмосферы. Этот слой должен был бы обладать свойствами отражения радиоволн и, таким образом, преодолеть ограничения, связанные с кривизной Земли. Физические принципы возникновения и существования такого слоя в то время не были понятны – они были развиты позднее. Последующее развитие техники связи с длинными и короткими волнами все более подкрепляли данную гипотезу, но прямое доказательство существования отражающего слоя было получено только в 1925 г. в экспериментах Эпплтона и Барнета с магнитной кольцевой и вертикальной дипольной антеннами. Это были, по сути дела, первые эксперименты по пеленгованию радиоволн и было показано, что волновой вектор входящих сигналов имеет наклон к горизонту. Этот тип волн получил название небесных волн (sky waves) или в русской терминологии – ионосферные волны. Развитие техники импульсной радиолокации в применении к ионосфере (работы Эпплтона, Брайта и Тьюва [Villard, 1976]) привело, во-первых, к открытию слоистости ионизированной области атмосферы, названной ионосферой, и, во-вторых, к изобретению устройства, способного определять ее состояние – ионозонда. Ре-

результатом работы ионозонда на сканирующей рабочей частоте является ионограмма – графическое изображение группового запаздывания и интенсивности отраженных сигналов в зависимости от частоты. Впервые ионограмма в классическом виде, принятом и в настоящее время, была получена в мае 1933 г. [Villard, 1976]. В дальнейшем, прогресс в разработке электронных компонентов, внедрение микропроцессоров и цифровой обработки сигналов дали возможность на основе сложных сигналов создать ионозонды со значительно пониженным потенциалом излучающих средств. Так, использование фазокодированных (ФКМ) сигналов позволило снизить мощность передающего устройства с ~ 20 кВт в классическом импульсном зондировании до ~ 0,5 – 1 кВт, а применение ЛЧМ-сигнала дает возможность получить ионограмму на нескольких десятках ватт или даже нескольких ваттах непрерывного излучения.

Развитие сети ионозондов, в совокупности с математическими методами инверсии ионограмм в вертикальный профиль электронной концентрации позволило собрать массив данных о состоянии ионосферы при различных уровнях солнечной активности, для различных сезонов и времени суток и построить на этой основе глобальные эмпирические (статистические) модели ионосферы. Первичной целью такого моделирования было описание пространственно-временного распределения электронной плотности, чтобы попытаться строить прогноз состояния ионосферы, а из него - прогноз распространения, прежде всего, декаметровых радиоволн. Для прогнозирования распространения радиоволн из одной точки пространства в другую используется специальный термин – "прохождение", отражающий частотный диапазон существования способов переноса излучения (модов). На этой основе в СССР в 1960-70-х годах была разработана система прогнозирования ионосферных радиокommunikаций, которая, в несколько модернизированном виде, существует и функционирует и в настоящее время в ИПГ [Жулина и др., 1969; Шлионский, 1961].

Начиная с середины 50-х годов, в практике ионосферных исследований широко используется метод наклонного зондирования (НЗ) ионосферы, при котором передающая и приемная часть зондирующей системы (в отличие от ВЗ) пространственно разнесены. На начальном этапе своего внедрения метод НЗ, в основном, использовался для обеспечения связи в декаметровом диапазоне длин волн (трассовое зондирование канала связи). Однако к концу 60-х годов появляются работы, посвященные использованию метода НЗ для целей дистанционной диагностики ионосферы.



новлении эффективного (с оценкой наиболее вероятного места его локализации)  $N_c(h)$  – профиля ионосферы. Исходными данными для соответствующей обратной задачи являлись экспериментально регистрируемые ионограммы НЗ, т.е. зависимость группового запаздывания  $P'(f)$  от частоты  $f$  зондирующих сигналов (несколько устаревшее и не совсем точное наименование - дистанционно-частотная характеристика ионосферы).

Среди достаточно широкого набора современных средств и методов исследования верхней ионизированной части атмосферы Земли метод многочастотного наклонного радиозондирования имеет в своем потенциале возможность решения двух задач: оценки диапазона прохождения радиоволн между двумя точками земной поверхности и дистанционной оценки параметров ионосферы в области отражения зондирующих волн. Соответственно, круг вопросов, связанных с первой проблемой, формирует прямую, а второе направление - обратную задачу наклонного зондирования ионосферы. В свою очередь, решение этих фундаментальных задач включает в себя как экспериментальные средства и методики радиозондирования, так и математические и программные методы решения задачи переноса излучения в неоднородной магнитоактивной низкотемпературной ионосферной плазме. Прикладные же аспекты проблемы, связанные с прогнозированием прохождения радиоволн, также включают в себя и современные сетевые средства передачи базовой геофизической информации.

**Актуальность работы.** В силу того, что распространение радиоволн в декаметровом диапазоне продолжает играть значительную роль в специальных системах радиокommunikаций и смежных задачах, таких как радиопеленгация и контроль среды над территорией РФ, вопросы развития и совершенствования этого научного направления, с учетом современных научных результатов в области ионосферного моделирования, ионосферного распространения радиоволн и технических средств, являются актуальными.

Исследовательские проекты, по которым автор был руководителем и результаты которых вошли в настоящую диссертацию, в разное время поддерживались грантами РФФИ, Государственными контрактами и целевыми федеральными программами: РФФИ (1994-1995, 2002-2004), ФЦП №26/ГФ/Н-08 (2007-2010).

**Цель работы.** Исследования и разработки, представленные в диссертации, имеют своей целью дальнейшее развитие метода многочастотного наклон-

ного радиозондирования ионосферы и его прикладного применения как в задаче прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере, так и в задаче диагностики состояния естественной и локально возмущенной ионосферы, в том числе и при воздействии мощных узких волновых пучков.

**Идея работы** состоит в том, чтобы:

а) на основе новых программных разработок и современных моделей ионосферы создать новую систему прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере, обобщающую традиционную существующую (созданную в ИЗМИРАН в 60-70-х годах) и позволяющую автоматизировать сбор общих данных на центральном сервере с возможностью их использования в долгосрочном и краткосрочном прогнозировании работы систем радиосвязи, а также в решении других специальных вопросов использования радиоволн декаметрового диапазона;

б) использовать метод многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы как эффективный и высокочувствительный инструмент диагностики состояния ионосферы, в том числе и при наличии локализованных ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения.

**Задачи исследований**, исходя из целей работы:

1. Разработка новой системы долгосрочного и краткосрочного (оперативного) прогнозирования с учетом текущего уровня солнечной активности и состояния ионосферы;

2. Исследование возможностей метода многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы в задачах с наличием крупномасштабных локализованных ионосферных возмущений;

3. Оценка эффективности предлагаемого, более высокой степени гладкости, метода инверсии ионограммы НЗ в эффективный высотный профиль электронной концентрации;

4. Исследование эффективности и адекватности разработанной системы прогнозирования прохождения радиоволн “Прогноз-ИЗМИРАН” в практике работы реальных радиолиний.

**Методы исследований** в достижении целей работы:

1. Теоретические, математические и программные разработки в области моделирования ионосферного распространения радиоволн декаметрового диапазона;

2. Экспериментальные исследования на установках, позволяющих осуществлять многочастотное наклонное и вертикальное зондирование ионосферы, а также специальные исследования в практике радиосвязи, электромагнитной доступности и одноточечной пеленгации источников радиоизлучения (ИРИ).

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработана и апробирована новая система долгосрочного и краткосрочного прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн – “Прогноз-ИЗМИРАН”, являющаяся развитием и обобщением на современном уровне классических методик ИЗМИРАН 1960-70-х годов;

2. Теоретически предсказан и экспериментально обнаружен принципиально новый тип отклика возмущенной области, генерируемой в области отражения мощной вертикально падающей волны накачки в методе наклонного ЛЧМ-зондирования, связанного с механизмом захвата зондирующих волн в открытый крупномасштабный резонатор, и формирование прожекторного эффекта (резонаторные моды в задаче диагностики);

3. Выполнена интерпретация уникальных данных проявления на ионограмме вертикального зондирования воздействия мощного наклонного волнового пучка на ионосферу. Показано, что при выполнении резонансных условий в области естественной фокусировки волнового поля на острие простой каустики может образовываться крупномасштабная неоднородность с пониженной электронной плотностью.

4. Разработан метод инверсии ионограмм НЗ в высотный профиль, основанный на построении устойчивого решения обратной задачи многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы в классе функций с непрерывным высотным градиентом, и однородный по параметрам профилей, получаемых из классических данных ВЗ.

**Достоверность** полученных научных и практических результатов базируется на применении научно обоснованных теоретических методов, современных средств разработки программных модулей, моделировании и обработке результатов многолетних экспериментов с использованием нового уникального

научного оборудования и анализе соответствия экспериментальных и теоретических исследований, в том числе, полученных другими авторами.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется поставленными задачами, разработанными методами их решения, впервые полученными результатами и состоит в следующем:

1. Разработана методика долгосрочного и краткосрочного (оперативного) прогнозирования прохождения радиоволн на основе общей системы трехмерных лучевых уравнений и глобальных моделей ионосферы (СМИ-88 и IRI-2001) в квазитрехмерной реализации и учете текущих данных солнечной активности и вертикального (в потенциале, и наклонного) радиозондирования в автоматическом режиме.

2. На массиве экспериментальных данных наклонного импульсного и ЛЧМ-зондирования ионосферы, данных по измерениям сигналов РВМ на длинных и сверхдлинных трассах и данных специальных экспериментов по работе реальных радиополучателей показана эффективность разработанных методик.

3. Открыт новый механизм отклика искусственно возмущенной вертикальным мощным волновым пучком области ионосферы при диагностике методом многочастотного наклонного радиозондирования – формирование резонантных модов.

4. Показано, что при резонансных условиях воздействие мощного наклонного волнового пучка может приводить к образованию в области естественной фокусировки - острия простой каустики открытого крупномасштабного резонатора, способного, при определенных условиях локализации ионозонда, формировать дополнительные следы на ионограмме ВЗ;

5. Разработан метод получения устойчивого решения обратной задачи НЗ в классе функций с непрерывным высотным градиентом.

**Личный вклад автора.** Диссертация обобщает результаты теоретических и экспериментальных исследований, в большей части которых участие автора было определяющим, а также в соавторстве, в основном, с сотрудниками ИЗМИРАН. Во всех работах, выполненных в соавторстве, автору принадлежит полноценное участие в постановке задач и, как правило, определяющее в математической и программной части и анализе данных. В частности, в работах по развитию прогнозирования ионосферного прохождения декаметровых радиоволн автору принадлежит постановка задачи, разработка методик совместно с

Кищей П.В., руководство и определяющее участие в окончательной программной реализации. Исследования в области решения обратной задачи выполнялись совместно с аспирантом Снеговым А.А., в двумерной обратной задаче - совместно с Барановым А.А., а исследования по спаданию поля в закаустическую область - совместно с Еременко В.А., который провел математическую часть задачи. Экспериментальные исследования по многочастотному наклонному радиозондированию и специальные приложения вертикального радиозондирования ионосферы в период 1980-2000 гг. выполнялись совместно с Лянным Б.Е., а ЛЧМ-зондирование искусственно возмущенной области, генерируемой нагревным стендом "Сура" в 2007-2010 гг. проводились совместно с Урядовым В.П. (ФНГУ "НИРФИ", Вертоградным Г.Г. (ЮФУ), Ивановым В.А. (МарТУ) и Валовым В.А. (ФГУП "НПП "Полет").

Теоретическое обоснование возможности существования резонаторных модов в задаче диагностики искусственно возмущенной области вблизи главного ионосферного максимума получено лично автором, а экспериментальное подтверждение - совместно с перечисленными участниками экспериментов 2007 - 2010 гг.

Данные по проявлениям воздействия мощного наклонного волнового пучка любезно предоставлены профессором Сэйлсом (G.S.Sales, Lowell, USA), а их интерпретация выполнена автором. Автор признателен всем коллегам по совместным работам.

**Практическая значимость** полученных в диссертации результатов заключается, прежде всего, применительно к декаметровому диапазону радиоволн, в разработке распределенной системы прогнозирования прохождения радиоволн "Прогноз-ИЗМИРАН", включающей в себя как средства расчета, так и обеспечения текущими гео-гелиофизическими данными. Система прогнозирования "Прогноз-ИЗМИРАН" является рабочим инструментом в практике работы ряда организаций РФ, использующих в своей деятельности ионосферную радиосвязь. Разработанные программные модули местоопределения ИРИ с использованием глобальных статистических моделей ионосферы используются в современных пеленгационных комплексах. Общие программы, иллюстрирующие процессы распространения радиоволн в ионосфере Земли, используются в учебном процессе.

**Реализация и апробация результатов работы.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом госбюджетных и целевых научно-

исследовательских работ в лаборатории моделирования волновых полей в ионосфере ИЗМИРАН. В целом система “Прогноз-ИЗМИРАН” была создана в ходе ОКР «Прогноз-ИЗМИРАН» и «Рукав» в 2003 - 2010 гг., прошла государственные испытания и была принята к эксплуатации в ряде организаций Минобороны и других ведомств. Данная система является действующей и используется, в том числе, и в учебном процессе, например, в Черкасском государственном университете (Украина). Результаты по диагностике искусственных возмущений ионосферы в экспериментах по нелинейному взаимодействию мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой получены, частично, в ходе выполнения ФЦП №26/ГФ/Н-08 2008 – 2010 гг.

Основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, докладывались и обсуждались на:

- Всероссийских конференциях по распространению радиоволн (XIV – Ленинград, 1984; XV – Алма-Ата, 1987; XXI – Йошкар-Ола, 2005; XXII – Ростов-на-Дону, 2008; XXIII – Йошкар-Ола, 2011);

- General Assambly of the URSI (XXV– Lille, France, 1993; XXX- Istanbul, 2011 );

- International Suzdal URSI Symposium “Effects of Artificial Action on the Earth Ionosphere by Powerful Radio Waves” (I - Москва (Суздаль), 1985; III – Москва (Суздаль), 1991; IV – Uppsala (Sweden), 1994; VII – Москва (ИЗМИРАН), 2007;

- Региональная конференция по распространению радиоволн (Санкт-Петербург) (2008; 2011);

- IRI/COST 296 Workshop, Prague, 2007;

и других научных конференциях и симпозиумах.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано более 50 работ в отечественных и зарубежных научных изданиях, в том числе, в журналах “Геомагнетизм и аэрономия”, “Известия вузов. Радиофизика”, “Электромагнитные волны и электронные системы”, Journal Atmospheric and Terrestrial Physics, Journal of Advances in Space Research, Annali di Geofisica, Computers & Geosciences, Acta Geophysica. В целом: 22 статьи в реферируемых научных изданиях (в том числе 22 публикации в журналах, входящих в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК, включая цитируемые зарубежные издания), 11 статей в сборниках научных трудов и 13 – тезисы докладов на конференциях и симпозиумах. Имеются работы, написанные лично автором.

## Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и списка литературы. Она содержит 327 страницы текста, 6 таблиц, 121 рисунок. Библиография включает в себя 205 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, обзор результатов, относящихся к теме диссертации, формулируются основные цели работы, результаты, выносимые на защиту, и приводится ее краткое содержание.

**Первая глава** посвящена вопросам разработки методики долгосрочного и краткосрочного прогнозирования. В основе методики лежит геометрооптический механизм распространения радиоволн в магнитоактивной трехмерно-неоднородной ионосфере – базовые лучевые уравнения рассматриваются в общем виде, а их применение в совокупности с глобальной ионосферной моделью сводится к квазитрехмерной реализации. Рассматриваются две глобальные статистические модели СМИ-88 [Часовитин и др., 1988] и IRI-2001 [Bilitza, 2001], из которых первая имеет большой потенциал, особенно в полярных областях, представления пространственно-временного распределения электронной концентрации и эффективной частоты соударений электронов с ионами и нейтральными молекулами газов. Также следует отметить, на наш взгляд, более адекватное описание слоя  $E$ , в частности, зависимость высоты его максимума от параметров солнечной активности и локального времени суток, чего нет в модели IRI-2001. Однако содержащиеся в модели существенные программные недоработки значительно ограничивают область ее применения. По этой причине модель IRI-2001 была доработана – в нее был внесен газокинетический механизм формирования эффективной частоты соударений электронов, взятый из модели СМИ-88. Общим недостатком обеих моделей является отсутствие законченного, доведенного до практического использования, представления спорадического  $E$ -слоя ионосферы –  $E_s$ .

Предложена методика адаптации модели к текущим геофизическим условиям, сочетающая взвешенный учет месячных и текущих данных солнечной активности и данные о параметрах главного ионосферного максимума, которые могут быть получены как из данных вертикального, так и наклонного радиозондирования. В модели IRI-2001 поток радиоизлучения  $F_{10.7}$  не является независимым параметром и, используя его прогнозные значения, можно попытаться построить подкорректированные (взвешенные) значения числа солнечных пятен  $R$  из среднемесячных и текущих данных и, как можно ожидать, получить более адекватную оценку, как самих ионосферных параметров, так и характе-

ристик прохождения радиоволн. Статистически согласованные значения параметров  $R$  и  $F_{10.7}$  связаны эмпирическими соотношениями между ними, взятыми в [Кононович и др., 2002]:

$$F_{10.7} = 64.604 + 6.694(R/10) + 0.282(R/10)^2 - 0.0085(R/10)^3$$

$$R = -114.553 + 21.846(F_{10.7}/10) - 0.715(F_{10.7}/10)^2 + 0.0140(F_{10.7}/10)^3$$

и в качестве входного параметра эмпирической модели  $R_z$  - текущего индекса солнечной активности взять комбинацию (обобщенное значение - generalized)

$$R_d^g = w_m R_m + w_d R_d^c,$$

где  $w_m, w_d$  - весовые коэффициенты для  $R_m$  - среднемесячного и  $R_d^c$ , полученного (вычисленного) для конкретного дня из текущего значения  $F_{10.7}$ , чисел солнечных пятен. Статистический характер модели, в общем случае, предполагает как для описания постфактум данных, так и для прогнозирования распространения радиоволн в качестве  $R_m$  использовать сглаженное, например, 13-месячным фильтром значение  $R_{12} = \frac{1}{12} \sum_{k=n-5}^{n+5} R_k + \frac{1}{2}(R_{n+6} + R_{n-6})$ , где  $n$  - индекс месяца, а  $R_n$

дается, например, европейской солнечной обсерваторией. В работе использовались равные весовые коэффициенты  $w_m = w_d = 0.5$ , поскольку, на сегодняшний день, нет данных, указывающих на преимущество какого либо из компонентов в суммарном процессе.

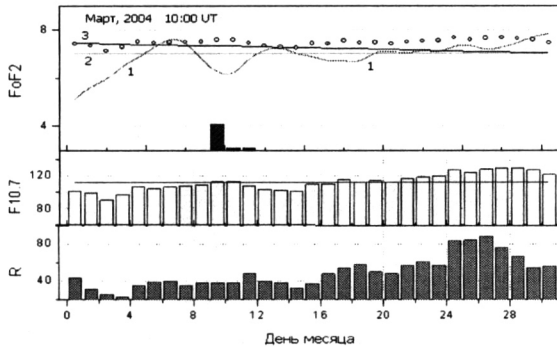


Рисунок 1. - Месячный ход критической частоты  $f_0F2$  для 10:00 UT на ст. ИЗМИРАН: кривая 1- сглаженные трехдневным фильтром экспериментальные величины со своим средним (кривая 2); модельные величины со среднемесячными солнечными параметрами (кривая 3) и с дополнительным учетом дневных значений потока солнечного радиоизлучения  $F_{10.7}$  (круглые точки).

Пример применения рассмотренной методики к месячным данным  $f_0F2$  (ИЗМИРАН) в локальный полдень за март 2004 иллюстрируется графиками рис. 1 – зависимостями критической частоты и параметрами солнечной активности. Видно, что реальные вариации критической частоты (зависимость от дня месяца в фиксированный момент времени суток), конечно, значительно более изменчив, нежели модельное представление, даже с учетом дневных солнечных параметров. Частично это связано с геомагнитной возмущенностью (дни с  $K_p > 3$  отмечены столбиками в нижней части графика критической частоты), а в некоторых случаях причина непонятна вообще. Такая ситуация описывается термином "ионосферная изменчивость" [Forbes et al, 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001]. Методика, основанная на учете текущего потока солнечного радиоизлучения, позволяет несколько отслеживать тренд (тенденцию) и, в общем случае, уменьшить дисперсию вариаций модельных кривых от экспериментальных величин  $f_0F2$ , т.е. справедлива в статистическом смысле. В частности, она позволяет переломить нисходящий модельный тренд, который никак не согласуется с данными ионосферных наблюдений для марта 2004 г., имеющими выраженную противоположную тенденцию.

Эмпирические модели ионосферы CMI-88 и IRI-2001 содержат ряд внешних управляющих параметров, важнейшими из которых являются значения главного ионосферного максимума:  $hmF2$ ,  $foF2$  – высота и критическая частота слоя  $F2$ . Это рутинно получаемые величины из данных вертикального радиозондирования ионосферы и их можно попытаться использовать в надежде учесть как дневные вариации (по аналогии с глобальными ионосферными индексами), так и вариации с масштабом в несколько часов, когда наблюдаются отклонения измеренных значений параметров максимума слоя  $F2$  от адаптированных модельных. Метод основан на представлении таких отклонений в опорных точках – дискретных точках оценки высотного распределения из данных зондирования как суперпозицию глобального и локального возмущений. Глобальная часть возмущения дает вклад в общее значение параметра  $R_p$  – эффективного (ионосферного) числа солнечных пятен, которое наиболее адекватно, например, в статистическом смысле, соответствует массиву наблюдаемых критических частот в опорных точках для данного отрезка времени. Т. е. в каждой точке наблюдения измеренному значению критической частоты можно сопос-

тавить некое эффективное значение параметра  $R_i^e$ , такое что  $foF2_{\text{мод}} = foF2_{\text{эп}}$ .  
 Обобщенным эффективным индексом будет комбинация

$$R_i^e = w_s R_j^s + w_c \frac{1}{N} \sum_n R_n^c$$

где  $N$  - число точек зондирования,  $w_s$  и  $w_c$  - весовые коэффициенты составляющих: обусловленных солнечной активностью и  $\frac{1}{N} \sum_n R_n^c$  - среднего эффективного числа солнечных пятен (ионосферный индекс). В данной работе использовались  $w_s = 0.6$  и  $w_c = 0.4$ . Далее, в каждой точке зондирования можно сформировать модельные значения с обобщенным параметром  $R_j^e$  и отклонения  $\sigma_i$  измеренных величин от модельных, например, для критической частоты  $\sigma_i = foF2'_{\text{эп}} - foF2'_{\text{мод}}$ .

Текущее распределение электронной концентрации в узловых точках вдоль заданной трассы формируется из модельных значений  $f_oF2(r)$  и  $h_mF2(r)$  с полученным эффективным параметром  $R_i^e$  и на весовом суммировании выделенных локальных отклонений. Вклад от конкретного локального возмущения определяется пространственной и временной корреляцией и весом является корреляционная функция экспоненциального вида, например, гауссов вид экстраполяции:

$$\sigma(x, t) = \frac{\sum_i F_i(x - x_i) \sum_j \sigma_j w_j}{\sum_i F_i(x - x_i) + 1 - \max_i F_i(x - x_i)}, w_i = \frac{F_i(t - t_i)}{\sum_k F_i(t - t_k)}, \sum_i w_i = 1$$

где  $\sigma(x, t)$  - искомое отклонение в некоторой точке пространства в момент времени  $t$  ( $\Delta t_i$  - отклонения от этого значения),  $\sigma_j$  - отклонения в точке измерения  $x$ , как функции времени  $t$ ,  $F(x)$  - пространственно-временная функции корреляции  $F_i(\Delta x) = F_i(\Delta \varphi) \cdot F_i(\Delta \lambda)$

$$F_i(z) = \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z}{\Delta z}\right)^2\right) \quad F_i(\Delta t_i) = \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta t_i}{\Delta t}\right)^2\right)$$

$\varphi$  - широта,  $\lambda$  - долгота,  $\Delta$  - радиус корреляции, являющейся в общем случае функцией координат, сезона, времени суток, солнечной и магнитной активности. В качестве первичной оценки пространственного радиуса корреляции ис-

пользовалась, полученная в [Кубова, 1985] эмпирическая зависимость  $foF2$  от сезона для средних широт:

$$\Delta_{\lambda} = 20 + 10 \cdot (1 - \cos 30 \cdot m) + 5 \cdot (1 - \cos 60 \cdot m)$$

$$\Delta_{\varphi} = 12 + 3 \cdot (1 - \cos 30 \cdot m) + 2 \cdot (1 - \cos 60 \cdot m)$$

где  $m$  - номер месяца. Так, например, для марта месяца радиус корреляции

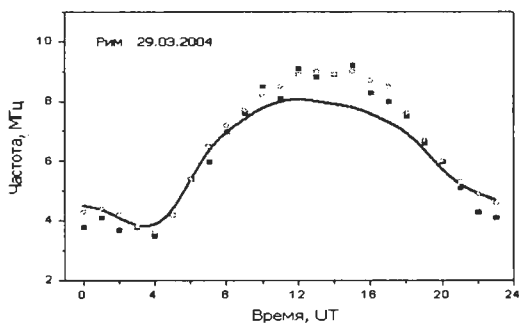


Рисунок 2. - Суточный ход критической частоты  $f_oF2$  для 29.03.2004 на станции Рим. Квадратиками отмечены экспериментальные данные, сплошная кривая – модельная зависимость со среднемесячным значением числа солнечных пятен и кружками (серого цвета) представлены прогнозные величины с эффективным  $R_s^c$ .

локального возмущения электронной концентрации по долготе и широте составляет  $\sim 40$  и  $20$  градусов соответственно. Временной радиус корреляции считается постоянным - его величина оценивается в 3 часа и использовались последние 3 часовые значения параметров максимума F2-слоя. Такая методика позволяет описать и в дальнейшем прогнозировать временные вариации МПЧ масштаба этого радиуса корреляции. Пример прогнозирования критической частоты для станции Рим на 29.03.2004, при использовании в качестве исходных данных уровень потока солнечного радиоизлучения для данного дня и 3-х часовые значения критических частот на станциях ИЗМИРАН и Афины, представлен на рис. 2. Для марта 2004 г. среднемесячное число солнечных пятен равняется 48.9, для данного дня уровень потока солнечного радиоизлучения составляет 129. Хорошо видно, что значительное локальное отклонение от модельного хода  $foF2$  в интервале 11:00-18:00 UT отслеживается по часовым

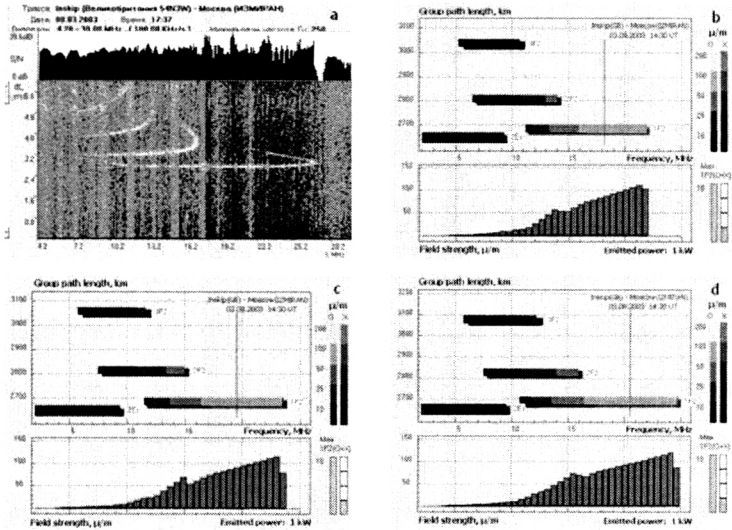


Рисунок 3. - Последовательное применение методики краткосрочного прогнозирования на трассе Англия – ИЗМИРАН 03/08/2003 14:30 UT: экспериментальная ионограмма (а) и синтезированные (б,в,г). Параметры солнечной активности для синтезированных ионограмм: (б) – среднеемесячное значение  $R_p$ , (в) – скорректированное по дневному значению потока радиоизлучения  $R_d^s$ , (г) – эффективное текущее (часовое) значение с учетом параметров максимума слоя F2 -  $R_2^s$ .

данным  $foF2$  на опорных станциях ВЗ, а сама кривая прогнозного суточного хода является сглаженной по отношению к часовым вариациям.

Эффективность всей методики, в частности, представлена на рис. 3 на примере данных наклонного радиозондирования для конкретного момента времени [Krashennnikov & Egorov, 2010]. В целом, методика была проанализирована в широком диапазоне индексов солнечной активности в 2002 -2007 гг. для периода весеннего равноденствия (марта месяца) на примере данных вертикального зондирования на ст. ИЗМИРАН и двух практически ортогональных трасс наклонного зондирования (Кипр – ИЗМИРАН и Англия – ИЗМИРАН), для которых анализировалось соответствие экспериментальных и модельных значений МПЧ. Показано, что относительные среднеквадратичные отклонения наблюдаемых МПЧ от модельных имеют нижнюю границу, оцениваемую в величину  $\sim 10\%$ , что, как отмечается, является следствием существенного расхождения

модельных и расчетных высотных профилей электронной концентрации [Kra-sheninnikov & Egorov, 2010]. На примере анализа данных измерений волнового поля на длинной (~ 7000 км) и сверхдлинной (~16000 км) трассах и измерений на связанных сигналах показана общая адекватность расчета напряженности поля и соотношения сигнал/шум. И в последнем разделе приведен и проанализирован интересный случай наблюдений комбинированных (E+F) модов прохождения одновременно на двух ортогональных трассах.

**Во второй главе** диссертации рассмотрены вопросы применения много-частотного наклонного радиозондирования или вертикального зондирования для диагностики локализованных ионосферных возмущений, имеющих естественное или антропогенное происхождение. Локализованное возмущение может быть вызвано, например, инъекцией легкоионизируемых веществ в нижней ионосфере или нагревом электронной компоненты плазмы верхней ионосферы в полях мощных волновых пучков. Локализованная динамическая неоднородность естественного происхождения – волновое возмущение с большим значением фактора возмущения при прохождении области формирования отраженного сигнала ионозонда ВЗ может приводить к разрушению классических следов, т.е. ионограмма уже не является, строго говоря, ионограммой ВЗ. При синтезе обратных отражений в методе ВЗ возникает ситуация, когда в области отражения показатель преломления обращается в нуль. Для этой ситуации рассмотрено асимптотическое представление лучевых уравнений и получено их представление, не имеющее особенностей и, таким образом, лучевая траектория плавно проходит точку отражения. Представлены примеры лучевых траекторий в естественной ионосфере, с расходящимися в плоскости магнитного меридиана магнитоионными компонентами.

Одним хорошо исследованным видом искусственного возмущения ионосферной плазмы является эффект воздействия мощного вертикального волнового пучка на ионосферу [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007] и метод много-частотного наклонного радиозондирования внес определенный вклад в изучение этой проблемы. Так, эксперимент по наклонному зондированию, с разном конечных точек симметрично относительно области нагрева, проведенный в 1982 г., показал два фундаментальных результата: а) было зафиксировано изменение МПЧ при воздействии мощной нагревной волны и б) обнаружено обратное рассеяние зондирующих сигналов от области возмущения. Другая кампания по наклонному зондированию, уже ЛЧМ-сигналом, проводилась в 2007 –

2010 гг. и здесь были получены также интересные результаты. В частности, используя более эффективный метод при значительно меньшей излучаемой мощности и пространственно разнесенную сеть приемных точек, был надежно установлен факт неизотропности рассеяния волнового поля на мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностях (~ 15-30 м в поперечном сечении),

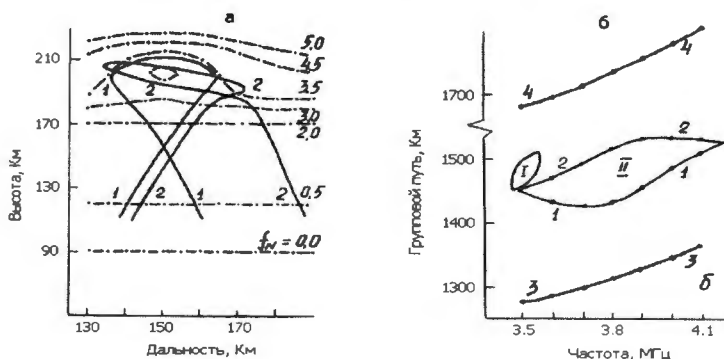


Рисунок 4. - Лучевые траектории (а) и структура межслоевой области ионограммы НЗ (диффузная область между следами 3 и 4-ой кратности) при сильном отрицательном локальном возмущении верхней ионосферы, локализованном в области средней точки трассы радиозондирования.

генерируемых в области отражения [Урядов и др., 2009]. При этом методом пеленгования было установлено, что источником рассеянного поля является действительно область отражения мощной волны накачки.

Также был экспериментально зарегистрирован, как показал анализ, новый механизм отклика возмущенной области ионосферы на зондирующие волны – захват волнового поля в крупномасштабную полость электронной концентрации, рефракцию в ней и высвечивание вниз. Этот эффект был назван прожекторным эффектом и, в отличие от классического ракурсного рассеяния [Урядов и др., 2009], имеет совершенно другую частотную зависимость (рис. 4) [Крашенинников и Лянной, 1988], узкий частотный диапазон существования и большую, чем при ракурсном рассеянии, энергетику. А сам механизм его формирования – резонаторными модами. Этот эффект критичен к степени крупномасштабного возмущения – так экспериментально он был зафиксирован только при наклоне антенн в направлении магнитного зенита

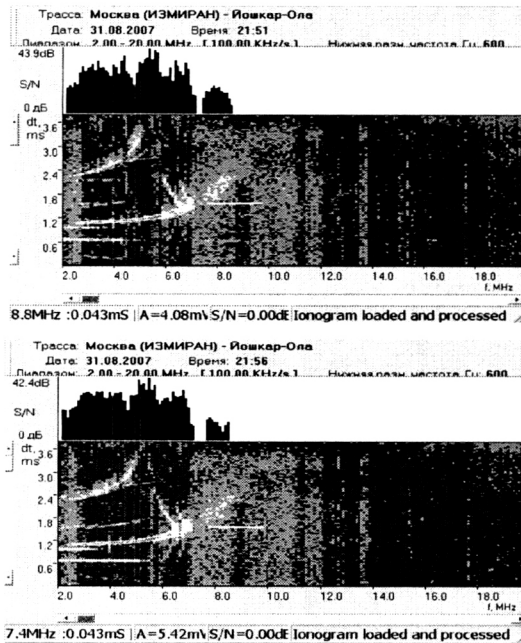


Рисунок 5. - Ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы Москва(ИЗМИРАН) – Йошкар-Ола (31.08.2007 17:51 UT - нагрев и 17:56 UT - пауза) со следами резонаторных модов.

и в ночных условиях, когда кардинально уменьшается поглощение в нижних слоях ионосферы, возрастает высота отражения, а значение критической частоты было достаточно высокое для отражения нагревной волны (рис. 5).

Другим разновидностью нелинейного взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой является наклонное падение узких волновых пучков на ионосферу со специфическим проявлением эффектов воздействия. На рис. 6 представлен пример эволюции узкого гауссова пучка, для которого наблюдается естественный для ионосферы эффект фокусировки поля в области острия простой каустики. Повышение напряженности электрического поля волны может быть причиной возникновения нелинейного взаимодействия мощного излучения с ионосферной плазмой и образование резонатора, подобного рассмотренному выше случаю. Первые научно поставленные экспериментальные исследования воздействия мощных наклонных волновых пучков на

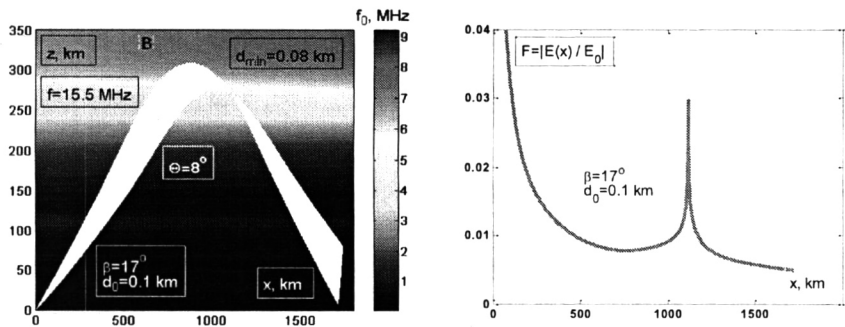


Рисунок 6. - Эволюция гауссова пучка с параметрами, определяемыми из диаграммы направленности антенны СГДРА для времени начала ночи (Москва, МДТ=22:00), высоким уровнем солнечной активности ( $R \sim 100$ ) и для резонансного угла возвышения.

ионосферу начались в ИЗМИРАН в середине 70-х годов и уже в этих экспериментах было отмечено возможное наличие нелинейных эффектов, выражающиеся в зависимости амплитуды пробного сигнала от наличия мощного излучения.

В эксперименте 1991 г. (США), который был поставлен как продолжение экспериментальных исследований в ИЗМИРАН в 1970-80-х годах, был достигнут рекордный уровень эффективной мощности излучения (90 ДбВт), примерно на порядок превысив аналогичный показатель в предыдущих экспериментальных исследованиях. В этом эксперименте наряду с подтверждением эффекта изменения поля пробного сигнала был зафиксирован устойчивый статический дополнительный след на ионограмме ВЗ, полученной ионозондом в средней точке между передающим и приемным пунктами (Альбукерк, Нью Мексико) – рис. 7. В естественном состоянии ионосферы статические следы, явно отделенные от следов основных модов, на ионограммах не наблюдаются в принципе. Следы, появляющиеся, например, при прохождении ПИВ имеют ярко выраженный динамический характер. В разделе 2.4 проведена интерпретация этого уникального экспериментального результата. В численном моделировании распространения наклонного волнового пучка на примере модели гауссова пучка показано, что наиболее эффективное проявления нелинейных свойств может иметь место, когда центр пучка проходит через точку соединения двух ветвей простой каустики. Интерпретация данных наблюдений была проведена в геометрии, что именно в области острия каустики могла образоваться локализо-

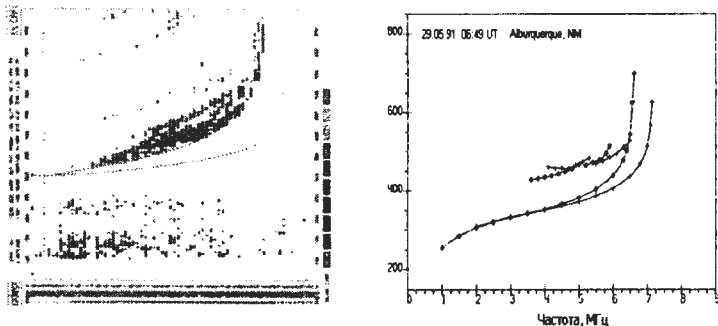


Рисунок 7. - Экспериментально наблюдаемый квазистатистический след на ионограмме ВЗ во время воздействия мощного наклонного волнового пучка на ионосферу и результат моделирования в модели с полостью электронной плотности - резонатором.

ванная неоднородность либо положительного, либо отрицательного знака. Рассматривалась ситуация с довольно большой степенью возмущения электронной концентрации, чтобы смогли выполняться условия геометрооптического отражения. В результате было показано, что наиболее вероятным является случай, когда обратное отражение формируется в неоднородности резонаторного типа (в большой степени аналог резонатора, рассмотренного в предыдущем разделе), открытым только для определенного сектора углов излучения [Bochkarev et al., 1997]. Подтверждением данной точки зрения служит дальнейшее поведение дополнительного следа, когда была изменена частота мощной волны (увеличена), то, как следствие, точка смыкания ветвей каустики сместилась и он исчез.

В разделе 2.5 проведена интерпретация также уникального, в своем роде, эксперимента в котором было зарегистрировано прохождение периодического ионосферного возмущения с большим относительным значением электронной плотности в неоднородности. Вертикальное зондирование проводилось с интервалом в 1 мин, что позволило детально проследить динамику его проявления на ионограммах. Характерным отличием такого сильного ПИВ от обычных волновых возмущений является кардинальное изменение структуры ионограммы - разрушение базовых модовых следов. На основе модели волнового возмущения класса акустико-гравитационных волн проведено исследование и моделирование его проявления в ионозондовых данных. Используя принцип анизотропии для магнитоионных компонент волнового поля излучения, показано, что волновой вектор такого возмущения ориентирован по направлению геомаг-

нитного поля. Аналогичного рода возмущения были зарегистрированы и при томографическом исследовании неоднородной структуры ионосферы [Куницын и др., 2007].

В третьей главе диссертации рассматриваются вопросы инверсии данных многочастотного наклонного радиозондирования – ионограммы наклонного радиозондирования в высотный профиль электронной плотности. Основное внимание уделяется решению одномерной обратной задачи, в которой источником данных является частотная зависимость группового пути на одном скачке, хотя и рассмотрено обобщение на двумерный случай – возможность оценки высотного профиля продольных градиентов электронной концентрации. В разделе 3.1 даны базовые уравнения для одномерной обратной задачи в предположении изотропной ионосферы:

$$P'(f_n) = 2 \int_{r_e}^{r_n} \frac{r dr}{\sqrt{r^2 \mu^2 - r_e^2 \cos^2 \beta_0^{(n)}}}, \quad \mu^2 = 1 - \frac{f_N^2(r)}{f_n^2}$$

$$D(f_n) = 2 \int_{r_e}^{r_n} \frac{r_e^2 \cos \beta_0^{(n)} dr}{r \sqrt{r^2 \mu^2 - r_e^2 \cos^2 \beta_0^{(n)}}} = D_0,$$

где  $r_n$  - высота отражения,  $r_e$  - радиус Земли,  $\beta_0^{(n)}$  - вертикальный угол прихода для частоты  $f_n$ . Для одномерной зависимости электронной концентрации решение обратной задачи НЗ в изотропном приближении сводится к решению системы нелинейных интегральных уравнений первого рода типа Абеля [Тихонов и Арсенин, 1978].

Как известно, для одномерной изотропной плоской ионосферы и Земли имеются соотношения Брайта и Тьюва и теорема Мартина, которые в совокупности дают аналитические соотношения, позволяющие пересчитать ионограмму НЗ в ионограмму ВЗ. Однако для сферически-слоистой ионосферы, а такое представление необходимо учитывать уже для дальностей, превышающих 500 км, таких соотношений нет и в разделе 3.2 рассмотрено применение грубого эмпирического приближения и оценена его погрешность на примере инверсии синтезированной ионограммы НЗ Москва(ИЗМИРАН) – Калининград(ЗО\_ИЗМИРАН) в модели IRI-2001 во время, близкое к локальному полудню, когда продольная неоднородность минимальна. Результаты моделирования даже в условиях, наиболее близких к требованиям применимости соотношений эквивалентности (слабые продольные градиенты электронной концентрации

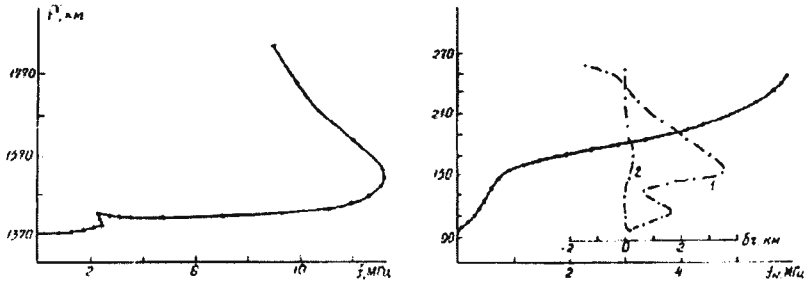


Рисунок 8. Тестовый пример. Ионограмма НЗ ( $D_0 = 1350$  км) и восстановленный в одномерной обратной задаче НЗ высотный профиль электронной концентрации (плазменная частота). Погрешность оценки представлена штрих-пунктирными кривыми (кривая 1- для двухпараметрической, кривая 2 – трехпараметрической аппроксимации).

и небольшая дальность), отчетливо показывают ограничения метода простого пересчета ионограмм НЗ в эффективные ионограммы ВЗ. На данной трассе мы имеем дело с практически поперечным распространением радиоволн, в котором показатель преломления обыкновенной компоненты близок к показателю преломления для изотропного приближения. И О-компонента пересчитанной ВЗ ионограммы действительно в приемлемых пределах соответствует обыкновенной компоненте истинной ионограммы ВЗ в средней точке, но Х-компонента кардинально не соответствует необыкновенной компоненте истинной ионограммы ВЗ.

Подход с прямой инверсией изотропной ионограммы НЗ в высотный профиль в классах непрерывных и непрерывно-дифференцируемых функций рассмотрен в разделе 3.3. Особенностью обратной задачи в классе непрерывно-дифференцируемых функций является неоднозначность решения в элементарном сегменте разбиения высотного профиля электронной плотности. Такое поведение связано с тем общим положением, что с повышением степени гладкости восстанавливаемого образа уменьшается устойчивость решения обратной задачи, в частности, может развиваться раскачка решения из-за производных в узловых точках, т.е. возникает осцилляция решения. В данном случае, как было получено из модельных примеров, вблизи истинного корня функции для двух- и трехпараметрической внутрисегментной аппроксимации близки друг к другу, и это свойство может быть использовано для нахождения истинного решения системы уравнений. Для этого начальное значение угла возвышения бе-

рется из решения задачи с двухпараметрической аппроксимацией и затем варьированием в уже гораздо более узком интервале находится точное решение. Численные исследования показывают, что такой комбинированный поиск решения обладает необходимой устойчивостью и сходимостью, в том числе, этот прием позволяет стабилизировать возможную раскачку решения (рис. 8). Обобщение методов решения обратной задачи в случае вырождения следа отражения от слоя E ионосферы, когда отсутствует зависимость группового пути от частоты, представлено в разделе 3.4. Принципиальным моментом в обратной задаче НЗ является магнитоионное расщепление ветвей ионограммы, что не позволяет напрямую применить разработанный метод к экспериментальным данным. Для дальностей трасс наклонного радиозондирования превышающих ~ 500 км получены асимптотические соотношения, связывающие виртуальный изотропный след с магниторасщепленными следами ионограммы НЗ. Предложенный метод учета геомагнитного поля позволяет с присмелой степенью точности получить ионограмму наклонного зондирования, которая имела бы место при распространении в изотропной неоднородной ионосфере на трассах, дальность которых превышает ~ 500 км и, применяя разработанные методы инверсии “изотропной” ионограммы, построить одномерную оценку высотного распределения электронной концентрации с предполагаемой локализацией в области средней точки трассы радиозондирования.

В разделах 3.6, 3.7 исследуется возможность решения двумерной обратной задачи, если измерения групповых задержек дополнены измерениями вертикальных углов прихода. В основе методов инверсии данных в высотные профили электронной плотности и продольных градиентов лежит метод возмущений в однотоочечном и двухточечном приближениях.

Проблемы, связанные с учетом немонотонного характера высотного профиля в межслоевой области E-F, рассматриваются в разделе 3.8, где показано, что долина межслоевой ионизации различным образом проявляется в данных вертикального и наклонного радиозондирования. Анализ комплексных данных (ВЗ и НЗ) на трассе Дурбс (Бельгия) - Рокетос (Испания) позволил сделать вывод, что структура следа ионограммы НЗ, формируемого слоем ионосферы выше E-слоя, чувствительна к высотному распределению электронной концентрации в межслоевой области, что может дать возможность получения корректного выбора представления высотного распределения в классе немонотонных функций. Представлены примеры сравнения высотных профилей, полученных по данным НЗ и в терминальных точках.

В целом, в главе дано последовательное изложение метода получения оценки высотного распределения электронной концентрации из ионограммы НЗ в классе непрерывно-дифференцируемых функций, однородного с результатами, получаемыми из ВЗ с учетом области ненаблюдаемой ионизации и экстраполяции параметров главного ионосферного максимума.

Основные моменты общего функционирования системы “Прогноз-ИЗМИРАН” и применения разработанных методов прогнозирования к специализированным исследованиям на реальных радиопутьях представлены в главе 4. Рассмотрены вопросы формирования общих и частных данных в системе прогнозирования. Первые включают в себя данные солнечной и геомагнитной активности, получаемые с серверов мировых данных и краткосрочного предсказания, и параметров максимума слоя F2 ионосферы, получаемых в результате автоматизированной обработки с использованием программы AutoScala (INGV, Италия), адаптированной для ионозонда “Парус” в ИЗМИРАН. Эти данные доступны как в ручном, так и автоматическом режиме с сервера ИЗМИРАН. Частные данные системы прогнозирования - это данные, относящиеся к терминальным точкам радиотрассы. Они включают в себя описание следующих систем и параметров:

а) электромагнитный шум в точке приема, включающий в себя атмосферную, галактическую и антропогенную компоненты;

б) систему радиосвязи (радиокommunikационную систему – РКС), для которой строится прогноз, с указанием мощности передающего устройства, параметра,

характеризующего минимально необходимое соотношение сигнал/шум для устойчивой работы системы радиосвязи (суммарный коэффициент защиты) и чувствительности приемного устройства;

в) передающие и приемные антенные системы, включенные в конкретный сеанс радиосвязи с возможностью выбора оптимальной конфигурации при наличии нескольких антенн с близкой азимутальной ориентацией.

Пример долгосрочного прогноза для условной р/трассы Иркутск(ИСЗФ) – Москва(ИЗМИРАН) приведен на рис. 9 для напряженности поля и соотношения сигнал/шум, на котором можно отметить временной интервал 05:00 – 10:00 UT, в котором прогнозируется прохождение мода 1F2, т.е. односкачковое прохождение на расстояние ~ 4200 км.

Представлены результаты сопоставления долгосрочного прогноза и оценок работы трех радиопроцессов с узкополосной РКС: южного, юго-западного и юго-восточного направлений с дальностями ~ 5000 – 7000 км в специальном режиме работы – сетка рабочих частот в интервале наличия радиосвязи перекрывала диапазон НПЧ – МПЧ и для каждого номинала определялось качество передачи. Пример такого анализа для р/трассы с дальностью ~ 6000 км представлен на рис. 10, где сплошными точками отмечены сеансы радиосвязи, для которых выполняются пороговые условия. В целом, наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, хотя фактор ионосферной изменчивости привел в некоторых случаях (в конкретные дни) к сильному их различию. Детальный анализ в рамках методики краткосрочного прогнозирования показал, что учет текущих дневных солнечных и часовых ионосферных в 3-х часовом интервале времени данных позволяет объяснить имеющиеся значительные отклонения от долгосрочного прогноза.

В **заключении** приводятся выводы и основные результаты, полученные в диссертации. Совокупность полученных автором результатов дает основание полагать, что диссертацию можно квалифицировать как крупное научно-обоснованное достижение в понимании механизмов и решении проблемы ионосферного распространения радиоволн, в обеспечении работы специальных систем связи, радиопеленгации и имеющее значение в повышении обороноспособности страны.

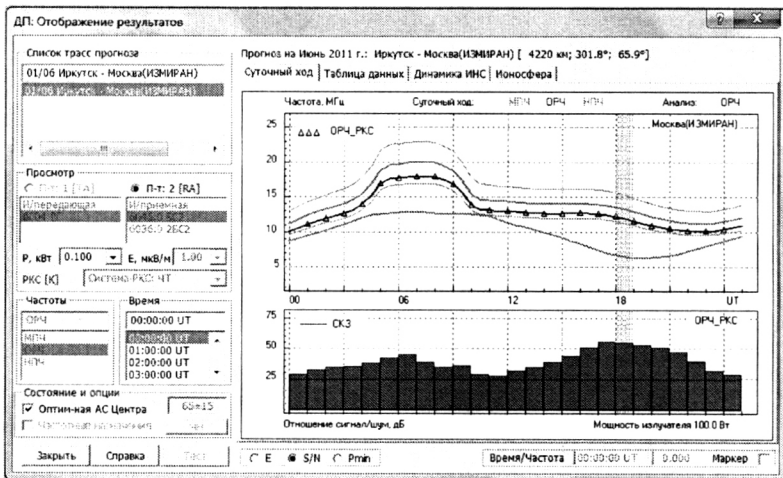
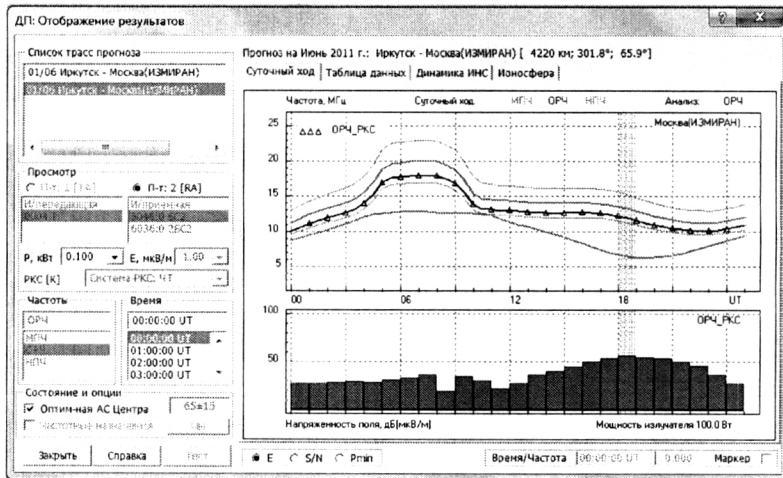


Рисунок 9. Долгосрочный прогноз прохождения радиоволн для р/трассы Иркутск – Москва(ИЗМИРАН) для июня 2011 г с зависимостью напряженности поля (верхний рисунок) и соотношения сигнал/шум (нижний рисунок) в точке приема. Отмечен пороговый уровень отношения сигнал/шум и оптимальный временной интервал для рассматриваемой системы радиосвязи.

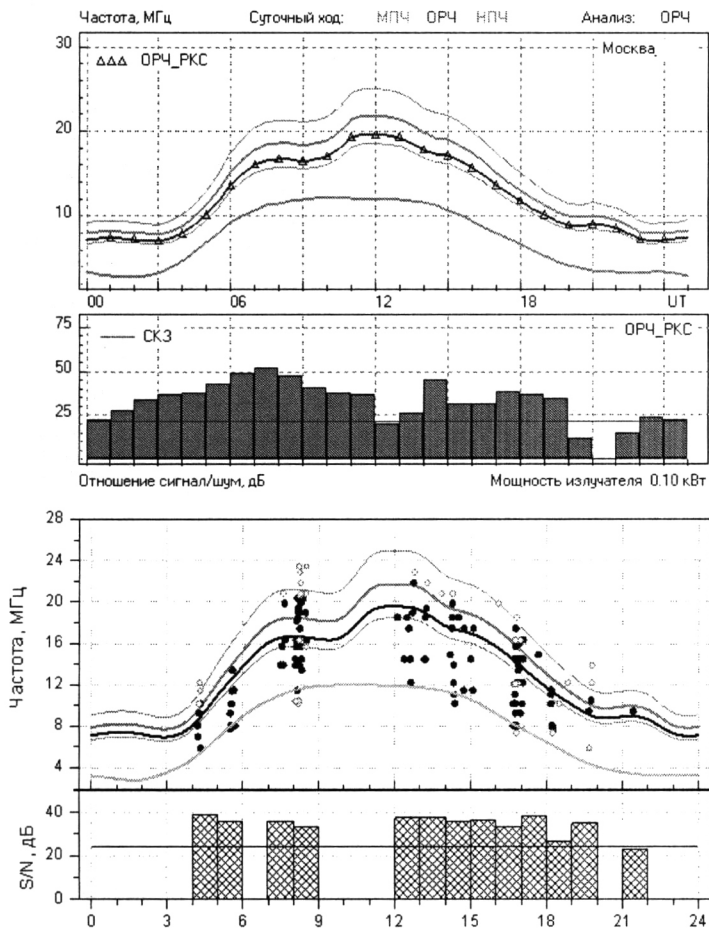


Рисунок 10. Долгосрочный прогноз для р/трассы (дальность ~ 6000 км, юго-западное направление) для октября 2009 г с антеннами: ВГДШ- корреспондент, 2БС2 – приемный пункт и результаты анализа при приеме в пункте Москва.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано более 50 печатных работ в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе в журналах “Геомагнетизм и аэрномия”, “Известия вузов. Радиофизика”, “Электромагнитные волны и электронные системы”, Journal Atmospheric and Terrestrial Physics, Journal of Advances in Space Research, Annali di Geofisica, Computers & Geosciences, Acta Geophysica.

Список основных публикаций (22 работы в реферируемых изданиях):

1. Крашенинников И.В. Оценка высотного распределения электронной концентрации по ионограмме наклонного зондирования ионосферы.  
*/ Крашенинников И.В., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е., Снеговой А.А. /*  
Геомагнетизм и аэрномия. Т. 23. № 5. С.727-732. 1983.
2. Крашенинников И.В. Изменение дистанционно-частотных характеристик наклонного зондирования в условиях искусственного возмущения верхней ионосферы.  
*/ Бахметьева Н.В., Бенедиктов Е.А., Бочкарев Г.С. и др. /*  
Геомагнетизм и аэрномия. Т.25. №2. СС. 233-238. 1985.
3. Крашенинников И.В. Модовая структура ионограмм НЗ при некоторых видах искусственного возмущения ионосферы.  
*/ Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. /*  
Геомагнетизм и аэрномия. Т.27. № 6. С.936-942. 1987.
4. Крашенинников И.В. Вариации траекторных характеристик сигналов НЗ в условиях искусственно возмущенной ионосферы.  
*/ Бочкарев Г.С., Кольцов В.В., Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. /*  
Известия ВУЗов. Радиофизика. Т.30. № 6. С.697-702. 1987.
5. Крашенинников И.В. Метод возмущений в обратной задаче наклонного зондирования двумерно-неоднородной ионосферы.  
*/ Баринов В.А., Крашенинников И.В. /*  
Известия ВУЗов. Радиофизика, т.31, № 10, С.1180-1185, 1988.
6. Крашенинников И.В. О диагностике локализованных искусственных неоднородностей в нижней ионосфере методом многочастотного наклонного зондирования.  
*/ Крашенинников И.В. /*  
Геомагнетизм и аэрномия. Т.29. № 4. С.635-640. 1989.
7. Крашенинников И.В. Об интерпретации одного вида перемещающегося ионосферного возмущения по ионограммам вертикального радиозондирования.  
*/ Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. /*  
Геомагнетизм и аэрномия. Т.31. № 3. С.427-433. 1991.

8. Крашенинников И.В. Моделирование многочастотного распространения КВ-сигналов в высоких широтах.  
*/ Кица П.В., Крашенинников И.В., Лукашкин В.М./*  
Геомagnetизм и аэрономия. Т.33. № 1. С.258-162. 1993.
9. Крашенинников И.В. Погрешности прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн на основе глобальной ионосферной модели.  
*/ Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Коломыйцев О.П. и Черкашин Ю.Н. /*  
Геомagnetизм и аэрономия. Т. 44. № 2. С. 221-226. 2004.
10. Крашенинников И.В. Формирование комбинированных модов в ионосферном прохождении радиоволн.  
*/ Крашенинников И.В., Егоров И.Б./*  
Геомagnetизм и аэрономия. Т. 45. № 2. С. 241-244. 2005.
11. Крашенинников И.В. Особенности поведения волнового поля радиоизлучения в окрестности максимально применимой частоты.  
*/ Еременко В.А., Крашенинников И.В., Черкашин Ю.Н. /*  
Геомagnetизм и аэрономия. Т. 47. № 3. С. 407-412. 2007.
12. Крашенинников И.В. Воздействие мощного наклонного радиоизлучения на ионосферу Земли.  
*/ Черкашин Ю.Н., Еременко В.А., Крашенинников И.В. /*  
Электромагнитные волны и электронные системы. Т.12. № 8. С.47-54. 2007.
13. Крашенинников И.В. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001.  
*/ Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Павлова Н.М. /*  
Геомagnetизм и аэрономия. Т.48. №4. с. 526-533. 2008.
14. Крашенинников И.В. О структуре и динамике области ионосферы с искусственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов.  
*/ Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Понятов А.А. и др. /*  
Известия ВУЗов. Радиофизика. Т.ЛІ. №12. С. 1011-1025. 2008.
15. Крашенинников И.В. Зондирование искусственно возмущенной области ионосферы с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала.  
*/ Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. /*  
Известия ВУЗов. Радиофизика. Т.ЛІІ. №4. С. 267-277. 2009.
16. Крашенинников И.В. Диагностика искусственно-возмущенной ионосферы с помощью современной техники зондирования.  
*/ Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. и др. /*

- Электромагнитные волны и электронные системы. Выпуск: Проблемы космических исследований. Т.15. С. 22–29. 2010.
17. Krasheninnikov I.V. Inversion Techniques for Determining the Electron Density Profile from Oblique Incidence Ionograms.  
*/ Krasheninnikov I.V., Liannoy B.E. /*  
Jour. Adv. Space Res. V.8. No.4. P. 83-87. 1988.
  18. Krasheninnikov I.V. Estimation of the ionospheric height profile with a continuous gradient from oblique sounding data.  
*/ Krasheninnikov I.V., Liannoy B.E. /*  
Jour. Atmos. Terr. Phys. V.52. No.2. P.113-117. 1990.
  19. Krasheninnikov I.V. Analysis of power-frequency dependence of oblique sounding ionograms.  
*/ Krasheninnikov I.V., Kisha P.V. and Broms M. /*  
XXV-th General Assambly of the URSI, Lille, France. Abstracts. P.357, 1996.
  20. Krasheninnikov I.V. Compatible analysis of vertical and oblique sounding data.  
*/ Krasheninnikov I.V., Jodogne J.-C. and Alberca L.F.. /*  
Annali di Geofisica. Vol.39(XXXIX). No.4. P.763-768. 1996.
  21. Krasheninnikov I.V. Autoscala: an Aid for Different Ionosondes.  
*/ Pezzopane M., Scotto K., Tomasik L., Krasheninnikov I. /*  
Acta Geophysica. V.58. No.3. P.513-526. 2009.
  22. Krasheninnikov I.V. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde.  
*/ Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. /*  
Computers & Geosciences. V.36. P.628-635. 2010.
  23. Krasheninnikov I.V. IRI-2001 model efficiency in ionospheric radiowave propagation forecasting.  
*/ Krasheninnikov I.V., Egorov I.B. /*  
Jour. Advances in Space Research. V.45. P.268-275. 2010.

## Цитируемая литература

- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. -2007. -Т.177. - №11. -С.1145-1177.
- Жулина Е.М., Керблей Т.С., Ковалевская Е.М. и др. Основы долгосрочно-го радиопрогнозирования. М.: Наука, 68 с. 1969.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 304 с. 1980.

-*Крашенинников И.В., Лянной Б.Е.* Модовая структура ионограмм НЗ при некоторых видах искусственного возмущения ионосферы. Геомагнетизм и аэрономия. Т.27. № 6. С.936-942. 1987.

-*Кубова Р.М.* Метод коррекции прогноза по измерениям в отдельных точках пространства // В кн. Прогнозирование ионосферы и условий распространения радиоволн. М.: Наука. С.65-67. 1985.

-*Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физмат, 336 с. 2007.

-*Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1978.

-*Фролов В.Л., Бахметьева Н.М., Беликович В.В.* и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением // УФН. Т.177. №3. С.330-340. 2007.

-*Часовитин Ю.К., Широчков А.В.* и др. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исследования. № 44 М.: МГК, 6-13, 1988.

*Шлионский Ш.Г.* Инструкция по расчету коротковолновых линий радиосвязи. М.: ИЗМИРАН. 126 с. 1961.

- *Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г.* и др. Зондирование искусственно возмущенной области ионосферы с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала. Изв. вузов. Радиофизика. Т.ЛII. №4. С. 267-277. 2009.

-*Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science. V. 36. No. 2. P. 261-275. 2001.

-*Bochkarev G.S., Krashenninikov I.V., Sales G.S.* The effects of powerful oblique radio transmission on the ionosphere on vertical sounding data // Jour. Atmos. Terr. Phys. V. 59. No. 18. P. 2305-2311. 1997.

-*Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X.* Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. № 8. P. 685 – 693. 2000.

-*Krashenninikov I., Egorov I.B.* IRI-2001 model efficiency in ionospheric radiowave propagation forecasting. Jour. Advances in Space Research. V.45. P.268-275. 2010.

-*Rishbeth H., Mendillo M.* Patterns of F2-layer variability // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 15. P. 1661-1680. 2001.

Подписано в печать 1.11.2011 г.  
Формат 60x84/16. Печ. л. 2  
Тираж 50 экз. Заказ 6276.

Издательство «Тривант»  
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии издательства «Тривант».  
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д. 52.  
Тел. (495) 775-43-35, (4967) 50-21-81  
E-mail: [trovant@trtk.ru](mailto:trovant@trtk.ru), <http://www.trovant.ru/>





102