

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Жбанков Геннадий Анатольевич

**РАЗРАБОТКА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ
ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ОКОЛОЗЕМНОМ
ПРОСТРАНСТВЕ**

1.3.4. Радиофизика (физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена в научно-исследовательском институте физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

Научный консультант: доктор физико-математических наук, доцент,
Мальцева Ольга Алексеевна

Официальные оппоненты: **Ясюкевич Юрий Владимирович**
доктор физико-математических наук, доцент, г. Иркутск, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии Наук», заместитель директора по научно-исследовательской работе

Демьянов Владислав Владимирович
доктор технических наук, профессор, г. Иркутск, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь»

Звездина Марина Юрьевна
доктор физико-математических наук, доцент, г. Ростов-на-Дону, федеральное государственное унитарное предприятие «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», ведущий научный сотрудник

Защита состоится «22» января 2027 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.19 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 5, Южный федеральный университет, физический факультет, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ им. Ю. А. Жданова по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1356091/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзыв (с указанием даты, полностью ФИО, учёной степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.19 по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 5, физический факультет ЮФУ, а также в формате pdf – на e-mail: ds@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.01.19



Губский Д.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В различных сферах деятельности современного общества – радиосвязь, гражданское информационное вещание, навигация, пеленгация – важную роль играют радиоволны коротковолнового (КВ) диапазона. Их качество и устойчивость напрямую связаны с состоянием околоземной, в частности, ионосферной плазмы Земли.

В диссертационной работе решается актуальная проблема диагностики ионосферы с учетом ее неоднородностей для определения условий распространения радиоволн в околоземном пространстве.

Экспериментально показано, что в ионосфере практически всегда присутствуют неоднородные структуры как волновой, так и хаотической природы с масштабами от 1 до 1000 км. Однако их учет вызывает большие трудности из-за сильного влияния на характеристики сигналов, распространяющихся в ионосфере, например, при отражении от нее из-за искажения поверхности равной электронной концентрации, приводя к федингу в каналах радиосвязи и другим нежелательным эффектам. Другой пример – явление возникновения многолучевости при распространении радиосигналов. Хорошо известное явление F-рассеяния сигналов напрямую связано с мелкомасштабными неоднородностями. Нас будут интересовать неоднородные структуры на высотах от 80 до 500 км (слои E и F ионосферы). Они возникают в результате случайных локальных процессов и оказывают влияние на распределение электронной концентрации в ионосфере.

Ионосферные неоднородности по размерам принято разделять на три типа: мелкомасштабные, среднемасштабные и крупномасштабные. Такое

деление основано на разных механизмах их взаимодействия с радиоволнами КВ-диапазона. Мелкомасштабные неоднородности с размерами до 5-10 км (первая зона Френеля) являются источником рассеяния радиоволн. Среднемасштабные (10–100 км) приводят к возникновению многолучевости распространяющихся сигналов и связанным с ней эффектам. Крупномасштабные обычно порождают фокусировку-дефокусировку лучей и плавное изменение углов их прихода.

Информация о состоянии ионосферы поступает со всего мира почти в реальном времени, но она фрагментирована и часто несовместима друг с другом. Основным средством изучения ионосферы являются ионозонды как наземного, так и космического базирования. Современные ионозонды, такие как DPS-4, Dinasonde-21, «Томион», «Парус-А» и другие, могут определять не только действующее расстояние отраженных лучей, но и их поляризацию, углы прихода, ослабление, доплеровскую задержку. Как следствие, появилась возможность определять не только вертикальный профиль электронной концентрации, но и другие параметры ионосферы, в частности, градиент электронной концентрации, присутствие и характеристики неоднородностей, скорость дрейфа ионосферных слоев и др. Для использования этих возможностей необходимо было разработать новые методы обработки и интерпретации с учетом полного набора экспериментальных данных. Особенно это касается ионограмм сложного вида, к которым относятся ионограммы вертикального, наклонного, спутникового зондирования, транзионограммы.

Распространение радиоволн в ионосфере без учета ее неоднородной структуры и магнитного поля можно описывать аналитическими или квазианалитическими методами с использованием упрощенных моделей, но для современных научных и практических задач необходимо использовать модели, максимально приближенные к реальным условиям.

Поэтому важную роль приобретает анализ распространения радиоволн в магнитоактивной неоднородной ионосфере на основе численного моделирования, возможности которого увеличиваются с развитием вычислительной техники. Для решения волнового уравнения в ионосферной плазме наиболее приемлемым приближением является метод геометрической оптики, обладающий к тому же рядом таких полезных свойств, как получение в ряде случаев аналитического решения, позволяющего проверить правильность получаемого решения, а также возможность сведения к уравнению эйконала, способы решения которого достаточно хорошо развиты. Именно он используется в данной работе для нахождения траекторных и энергетических характеристик радиоволн при решении поставленных задач.

Другим эффектом развития техники зондирования и систем связи стало появление глобальной сети ионозондов, связанных общим банком данных. Благодаря этому можно одновременно получать результаты зондирования в разных точках. Это позволяет проводить уточнение существующих ионосферных моделей по ее реальному состоянию для решения задач дальней КВ радиосвязи и обнаружения целей. Методам коррекции ионосферных моделей в настоящее время уделяется значительное внимание. Однако их основными недостатками являются получение результатов для модели локального географического региона, использование только одного типа зондирования или уточнение лишь значений критической частоты f_oF2 , не принимая во внимание изменение ее остальных характеристик.

Сравнительно новым параметром ионосферы является ТЕС (total electron content) ионосферы, определяемым как число электронов в столбе площадью 1 м^2 вдоль траектории луча от передатчика на спутнике к приемнику на Земле. Возможности его использования обозначили новую эру в ионосферных исследованиях.

Таким образом, на современном этапе развития актуальность работы заключается в том, что:

- в связи с модификацией ионозондов возникла необходимость создания новых методов обработки экспериментальных данных;

- с увеличением мощности компьютерной техники появилась возможность обработки и интерпретации данных отечественного спутника ИК-19;

- с ростом важности освоения Арктики появилась необходимость знания состояния ионосферы и ее параметров в этом регионе, а его труднодоступность привела к необходимости использования альтернативного метода – транзионосферного зондирования, идея которого зародилась еще в 80-ые годы, но технология реализации была развита слабо;

- появление навигационных спутников и бурное развитие спутниковой связи показало важную роль ещё одного параметра ионосферы – полного электронного содержания (ТЕС);

- создание общей сети мониторинга ионосферы потребовало создания единой глобальной системы обработки данных различных типов зондирования.

Все вышеприведенное указывает на то, что решение многочисленных проблем, связанных с диагностикой ионосферной плазмы, имеет первостепенное значение. Это и составляет **проблему диссертации: диагностика ионосферы с учетом ее неоднородностей на основе экспериментальных данных путем разработки методов численного моделирования, коррекции ионосферных моделей в соответствии с текущим состоянием ионосферы, использования ТЕС для прогноза состояния ионосферы**. Поскольку эти проблемы относятся ко всем типам зондирования, они приводят к общей **проблеме создания единой системы диагностики ионосферы, учитывающей неоднородности**.

Развитые в диссертации методы диагностики являются важными решениями, которые уже осуществляются в станциях дальней радиолокации, при эксплуатации ионозондов Dinasonde-21 и «Томион», в работе космической группировки «Ионосфера-М» с 4 спутниковыми ионозондами, запущенной в 2024-2025, и находят свое применение в разработке идеологии российской орбитальной станции РОС, запуск которой планируется на 2030 год.

Проводимые исследования соответствуют приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ, приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России (указ Президента РФ от 18.06.2024 №529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий»).

Цели и задачи исследования.

Целью диссертационного исследования является разработка методов диагностики ионосферы для совокупности всех возможных типов зондирования (вертикальное, наклонное, внешнее, трансionoсферное) на основе единого подхода к моделированию распространения радиоволн, коррекции ионосферной модели, учету неоднородностей, использованию ТЕС для прогноза состояния ионосферы.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие **задачи**:

- исследование и определение наиболее эффективного численного алгоритма расчета характеристик распространения КВ-сигналов;
- решение лучевых уравнений в магнитоактивной среде для крутопадающих траекторий вблизи точки отражения;

- тестирование современных моделей ионосферы по данным различных типов экспериментов для оценки возможности их использования в задачах диагностики среды;
- разработка новых методик и алгоритмов восстановления профилей электронной концентрации N_e в ионосфере с учетом особенностей системного радиозондирования по данным ионозондов различных типов;
- разработка принципов обработки и анализа данных ионозонда DPS-4 для автоматизированного расчета F рассеяния, их реализация в виде программного комплекса «Viewer_DPS4»;
- формулировка и обоснование принципа учета неоднородностей ионосферной плазмы на примере сложных ионограмм ИСЗ ИК-19 с привлечением программ траекторных расчетов и реконструкции пространственного распределения электронной концентрации;
- разработка методики коррекции глобальной модели ионосферы для соответствия экспериментальным данным различных типов ионосферных исследований;
- исследование на основе численного моделирования возможности применения принципов трансionoсферного зондирования к диагностике ионосферы, в том числе возможных результатов использования ионозондов в комплексном эксперименте «Ионосфера-М»;
- анализ возможностей определения состояния ионосферы и ее параметров, связанных с использованием полного электронного содержания ТЕС.

Объекты исследования

Объектами исследования являются радиофизические методы диагностики ионосферы на основе численного моделирования распространения радиоволн КВ-диапазона с целью обеспечения информацией наземных и спутниковых систем связи.

Предметы исследования

Предметом исследования являются возможности диагностики ионосферы с помощью наземных и спутниковых систем как средства определения ее состояния и коррекции моделей ионосферы по экспериментальным данным.

Методы исследования

В данной работе используется комплексный подход, заключающийся с одной стороны в моделировании ионосферы как среды распространения, а с другой стороны – в разработке и сравнительном анализе различных численных методов расчета параметров распространения КВ-радиосигналов в неоднородной магнитоактивной среде. Исследования включают использование компьютерного моделирования и обработку экспериментальных данных. При этом использованы как теоретические методы (радиофизики, физики плазмы), так и статистические методы (теория вероятностей, теория случайных процессов).

Научные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный комплекс обработки и анализа данных «Viewer_DPS4» позволяет получать и использовать параметры неоднородностей нижней ионосферы, связанные с F-рассеянием сигналов. Его преимущество состоит в автоматизированном расчете этих параметров и возможности детального анализа отраженных эхо-сигналов.
2. Созданный на основе программного обеспечения NeXtYZ инструмент dynasonde-21 реализован в виде реальных ионозондов в

международном масштабе и позволяет получить 3-х мерные структуры нижней ионосферы.

3. Метод корректировки ионосферных моделей на основе коэффициента коррекции с использованием данных всех типов ионосферного зондирования позволяет максимально приблизить ионосферную модель к реальной ситуации и существенно увеличить пространственную область его применения.
4. Полученные в рамках обработки и интерпретации данных внешнего зондирования результаты позволили определить параметры верхней ионосферы, которые нельзя получить при зондировании с земли, обнаружить неизвестные следы на ионограммах, получить статистику наблюдений неоднородностей.
5. Результаты, полученные при моделировании ионограмм трансionoсферного зондирования, выявили возможности использования нескольких типов орбит спутников, позволили предложить несколько схем экспериментов, в том числе ТИЗ и ОТИЗ.
6. Предложенная корректировка модели ионосферы с использованием ТЕС и эмпирической медианы эквивалентной толщины позволяет определять f_oF2 и строить полный Nh-профиль ионосферы от ее начала до любой высоты спутников.

Научная новизна результатов исследования:

- разработана методика расчета траекторий КВ-радиоволн в ионосфере методом характеристик, позволяющая учесть особенность поведения крутопадающих волн в окрестности особой точки;
- разработаны новые методы восстановления высотных профилей электронной концентрации в ионосфере по данным наземных ионозондов вертикального зондирования;

- разработано оригинальное математическое обеспечение для ионозонда DINASONDE-21, отличающееся возможностью восстановления трехмерного N_h -профиля;
- создан инструмент автоматизированной обработки и анализа данных ионозонда DPS-4, позволяющий исследовать эффект F-рассеяния с определением параметров мелкомасштабных неоднородностей;
- разработана методика моделирования сложных спутниковых ионограмм, отличающаяся учетом неоднородностей;
- методы определения параметров ионосферы при транзионосферном зондировании, отличающиеся использованием различных ионозондов;
- использование полного электронного содержания для определения критических и максимальных применимых частот на КВ-трассах через расчет эмпирической толщины ионосферы $t(\text{obs})$ более эффективно по сравнению с использованием t различных моделей.

Практическая значимость заключается в разработке:

- методики расчета траекторий КВ-радиоволн в окрестности особой точки;
- новых методов определения $N(h)$ -профилей в ионосфере по данным наземных и спутниковых ионозондов;
- алгоритмизации и автоматизации процесса определения параметров ионосферы при F-рассеянии;
- метода построения сложных спутниковых ионограмм со следами неоднородных структур;
- коррекции глобальной модели ионосферы по экспериментальным данным различных типов ионосферных измерений с использованием «коэффициента коррекции» для основных ионосферных параметров;
- принципа использования полного электронного содержания для оценки состояния ионосферы.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертационная работа посвящена развитию теории и практики мониторинга ионосферы, включающему разработку методов ее диагностики. Область диссертационного исследования включает разработку методик использования результатов радиозондирования как диагностики ионосферы.

Указанная область исследования соответствует формуле специальности 1.3.4 – «Радиофизика», а именно пункту 5 – «Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание систем дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы. Радиоастрономические исследования ближнего и дальнего космического пространства».

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается строгой математической постановкой решаемых задач, адекватностью используемых моделей среды распространения в реальной ионосфере, согласованностью полученных результатов с экспериментальными данными, а также совпадением полученных результатов в предельных случаях с результатами, полученными другими авторами.

Внедрение результатов работы

Результаты работы использовались:

– в работах научно-исследовательского института физики ЮФУ:

- отчет о научно-исследовательской работе «Принципы обеспечения ионосферной информацией наземных и космических систем нового поколения» (заключительный) БЧ№3.9696.2017/8.9, Ростов-на-Дону, 2019, 90 с.
 - отчет о научно-исследовательской работе «Исследование отклика околоземной плазмы на геомагнитные возмущения методами спутникового и наземного радиозондирования» (итоговый) 2.5836.2011, Ростов-на-Дону, 2013, 48 с.
 - отчет о научно-исследовательской работе «Исследование эффектов внутренних гравитационных волн в ионосфере» (заключительный), Ростов-на-Дону, 2011, 27 с.
- в отчете по научно-исследовательской работе «Эврика-2016-ЮФУ»,
 – в отчете по НИР АО «РТИС ВКО» «Разработка методологии обеспечения необходимой гелиогеофизической информацией средств системы загоризонтного обнаружения и адаптации средств в сложных гелиогеофизических условиях, в том числе при работе в области высоких широт»,
 - в программном комплексе ионозондов системы DYNASONDE-21.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 52 всероссийских и международных конференциях, в том числе:

- General Assembly of URSI (Netherlands, 2002; USA, 2008; China, 2014);
- RF Interactions Workshop, (Santa Fe, New Mexico, 2004);
- International Ionospheric Effects Symposium (2005, 2011);
- URSI National Radio Science Meeting (USA, 2008);
- COSPAR Scientific Assembly (India, 2012; Russia, 2014);

- International Reference Ionosphere Workshop (Poland, 2013; Cyprus, 2019);
- WSEAS International Conference on Wireless and Mobile Communication Systems (France, 2013);
- International Beacon Satellite Symposium BSS2013 (UK, 2013);
- Progress in the Electromagnetics Research Symposium (China, 2014);
- URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (Korea, 2016);
- URSI Atlantic Radio Science Meeting (Meloneras, 2018);
- International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, 2012, 2014);
- международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ». (Таганрог-Дивноморское, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021);
- международной конференции «Волны в неоднородных средах и интегрируемые системы» (Калининград, 2019).
- Apatity Seminar “Physics of Auroral Phenomena” (Apatity, 2010, 2011, 2014, 2015, 2016, 2019, 2021, 2023, 2024);
- всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (2008, 2011, 2014, 2019, 2021, 2023);
- всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред», (ВКА имени А.Ф.Можайского, 2009, 2011, 2019);
- международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, ИКИ РАН, 2013, 2016, 2022);
- конференция "Физика плазмы в солнечной системе" (Москва, ИКИ, 2013, 2016, 2023);
- международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и

инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком», Москва, МИРЭА, 2024, 2025).

Публикации

Публикации по теме диссертации включают 80 работ, из них 31 – в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS, 9 работ – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора включал проведение теоретического рассмотрения, создание алгоритмов и программных комплексов, при использовании которых выполнено численное моделирование с обработкой экспериментальных данных и анализом результатов, обсуждение совместных публикаций. Все представленные в диссертации результаты получены соискателем лично или при его непосредственном участии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 280 страниц машинописного текста, содержит 161 рисунок, 11 таблиц и список литературы из 285 наименований.

Введение представляет анализ современного состояния и основных перспективных направлений развития методов диагностики ионосферы с акцентом на использование численного моделирования. Отмечается актуальность и значимость проводимого исследования. Определяются цели, задачи и методы исследования.

Первая глава включает описание метода характеристик как основного метода численного моделирования распространения КВ-

радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере, представлена методика моделирования, включающая алгоритмы расчета траекторий методом характеристик, основанным на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих пространственные, частотные и энергетические характеристики распространения радиоволн. Детально описано решение граничной задачи. Проводится сравнение данного метода с методом подталкивания упругой нити.

В разделе 1.1.2 исследована особенность решения уравнений для крутопадающих на ионосферу лучей в магнитоактивной ионосфере при $\nu=1$. Разработана методика расчета траекторий КВ-радиоволн в ионосфере методом характеристик в окрестности особой точки с помощью поверхности Поверлейна.

Особое внимание уделено анализу численных методов интегрирования соответствующей системы дифференциальных уравнений и использованию в качестве среды распространения различных современных ионосферных моделей. Показано, что, в зависимости от поставленных задач и начальных условий, желательно использовать различные схемы решения. Выводятся общие формулы, используемые для задания ионосферных неоднородностей в рамках численного моделирования: одиночных крупномасштабных неоднородностей, перемещающихся ионосферных возмущений (волнового типа), мелкомасштабных неоднородностей.

Во второй главе рассматривается задача восстановления реального высотного профиля электронной концентрации по данным ионозондов (наземного или спутникового).

В разделе 2.1 предложены три метода восстановления $N(h)$ -профилей, которые можно использовать в качестве автоматизированной (полностью или частично) процедуры, обеспечивающей более высокую точность, чем традиционные методы. Их особенность состоит в учете магнитоактивности

ионосферы и использовании численного расчета траекторий радиоволн в качестве основного инструмента.

Предлагаемые методы условно различаются исходными данными: 1) несколько базовых точек ионограммы, 2) оцифрованная ионограмма, 3) их комбинация.

В первом случае используется свойство ионосферной модели расчета профиля, используя несколько базовых параметров, которые или явно задаются пользователем, или рассчитываются самой моделью. Разные наборы приводят к различным профилям. Таким образом, изменяя значения данных параметров и сравнивая рассчитанные при использовании полученного профиля действующие высоты для реперных частот с экспериментом, можно получить профиль с их минимальными отличиями. Его можно считать моделью, соответствующей реальной ионосфере.

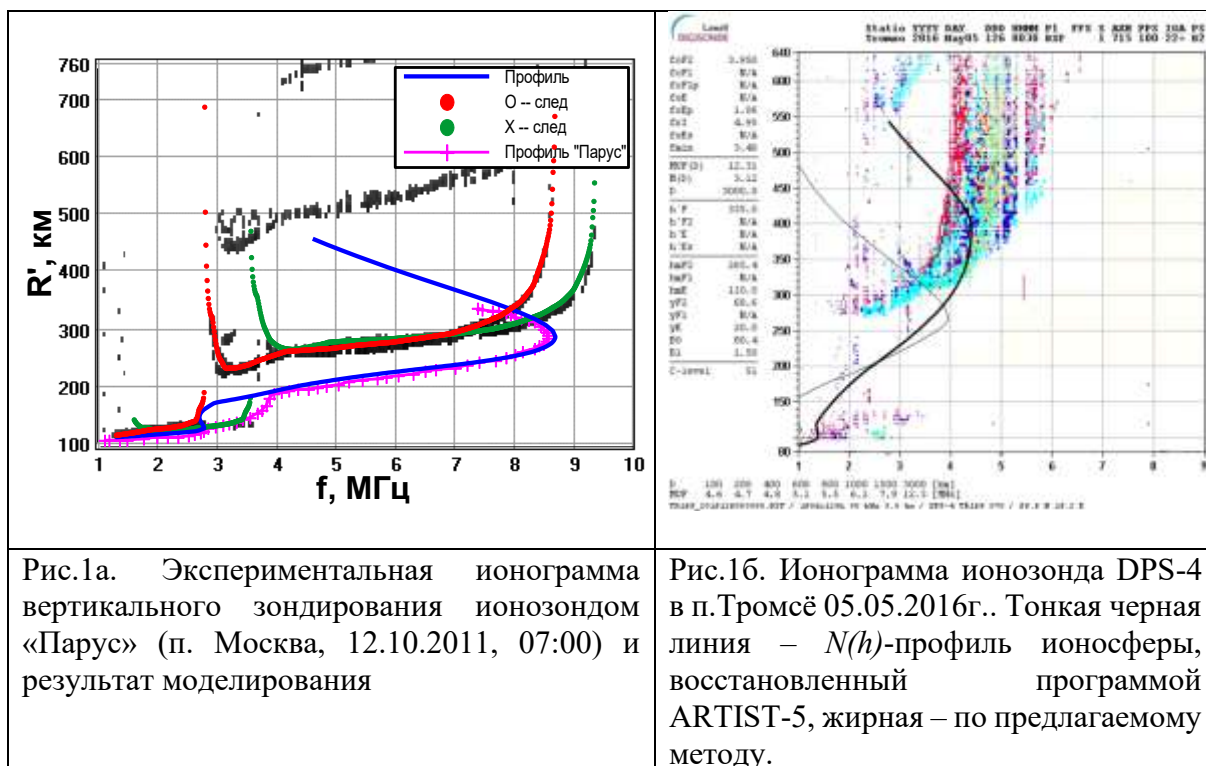
Второй метод восстанавливает профиль электронной концентрации в ионосфере, используя полученные из ионограммы данные оцифровки следа наиболее информативной компоненты (обыкновенной или необыкновенной). В случае, когда отражения отсутствуют (ниже начальной частоты ионограммы и область долины), в качестве начального приближения используется эмпирическая ионосферная модель для данного места и времени. В остальном диапазоне восстанавливаемый профиль не зависит от модели. Вследствие этого достигается максимальное соответствие полученного профиля реальному.

Комбинированный метод заключается на первом этапе в расчете профиля по оцифрованной ионограмме. Затем, используя полученные результаты, для конкретной ионосферной модели подбираются дополнительные параметры, при которых функционал невязки времен распространения радиоволн (экспериментальных и рассчитанных с использованием модели) на различных частотах минимален. Это является критерием того, что получена ионосферная модель, для которой

вертикальный профиль электронной концентрации наиболее приближен к реальному.

Предлагаемые методы обладают своими достоинствами, их использование зависит от конкретных условий и целей решаемых задач.

Проверка работоспособности методов и сравнение их результатов со стандартными, используемыми для расчета профилей в ионозондах различных типов (рис.1), показала их устойчивость и лучшее качество как в случае сложного профиля (присутствие слоев E, F1 и F2 – рис.1а), так и в возмущенных условиях (рис.1б).



В разделе 2.2 подробно описан программный комплекс «Viewer_DPS4» как инструмент обработки и анализа данных ионозонда DPS-4. Его особенностями являются:

– создание модуля «Fspread-18», позволяющего автоматически определять параметры F-рассеяния;

– модуль «LocalDrift» для изучения дрейфа ионосферной плазмы, предоставляющий дополнительные возможности обработки полученных данных.

Приведены примеры апробации комплекса на сравнении с результатами суточного хода F-рассеяния, полученными с помощью ручной обработки ионограмм DPS-4 на станции в ИЗМИРАН (Москва). Погрешность составляет менее 10% и связана, в основном, с ошибками восстановления $N(h)$ -профиля ионосферы программой ARTIST-5. Также показано использование модуля «LocalDrift» для сравнения направления дрейфа неоднородностей в F-области и рассчитанной независимо ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей.

В разделе 2.3 детально представлены принципы построения, алгоритмы, результаты функционирования нового инструмента dynasonde-21 и соответствующая программа NeXtYZ. Отличительной особенностью данного ионозонда является возможность регистрации для каждого отраженного эха таких параметров, как время распространения, энергетика, поляризация, фаза, полярный и азимутальный углы прихода. Это позволяет автоматически восстанавливать трехмерный $N(h)$ -профиль ионосферы в предположении клиновидно-стратифицированной ионосферы. При этом нормаль к поверхности электронной плотности определяет локальное направление общего градиента в слое. Показано, что алгоритм NeXtYZ является более устойчивым к некачественным или недостаточным данным и его использование позволяет наиболее точно определять не только трехмерную структуру распределения электронной концентрации, но и погрешность на каждом шаге процедуры и в целом, доплеровские сдвиги и скорости дрейфа.

Пример получаемой ионограммы приведен на рисунке 2.

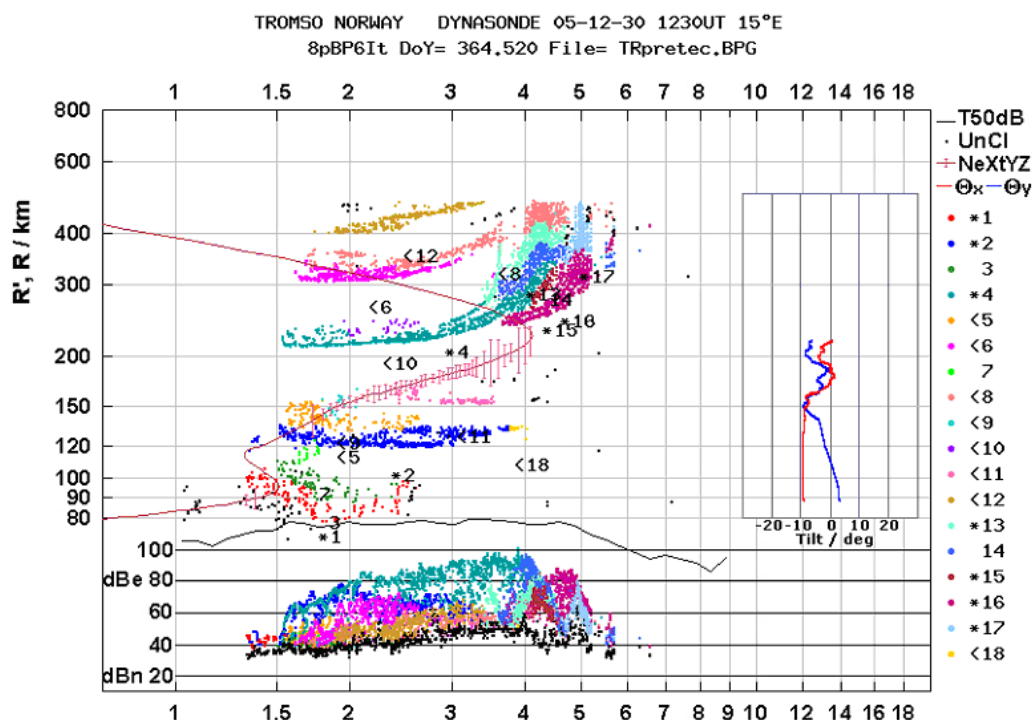


Рис.2. Верхняя панель стандартного изображения ионограммы Диназонда-21.

Также в данной главе исследуется, как влияют мелкомасштабные неоднородности на форму ионограмм вертикального зондирования таких ионозондов, как DPS-4 и dynasonde-21.

В **третьей главе** на основе численного моделирования разработана схема интерпретации сложных ионограмм спутника Интеркосмос-19, модифицированных влиянием неоднородностей ионосферной плазмы. Это позволило обнаружить на ионограммах внешнего зондирования такие ранее неизвестные следы, как наклонные отражения от Земли, задержанный нижний след, рассеянные и многократные следы, жемчужины, волноводные следы.

Разработанные методы траекторных расчетов и моделирования позволили интерпретировать эти данные фактом присутствия в верхней ионосфере неоднородностей различных масштабов. Распределение электронной концентрации восстанавливалось по описанному во второй главе комплексному методу, при моделировании ионограмм

использовались траекторные расчеты распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной среде методом характеристик.

Примеры влияния сильных горизонтальных градиентов электронной концентрации, вызванных собственно ионосферными условиями (провал, аномалия) либо наличием одиночных крупномасштабных неоднородностей, на ионограммы внешнего зондирования со спутника ИК-19 приведены на рис.3. Здесь и далее черным цветом выделены экспериментальные ионограммы, цветные значки соответствуют результатам моделирования. Отличительным признаком таких ионограмм может являться наличие четких дополнительных следов.

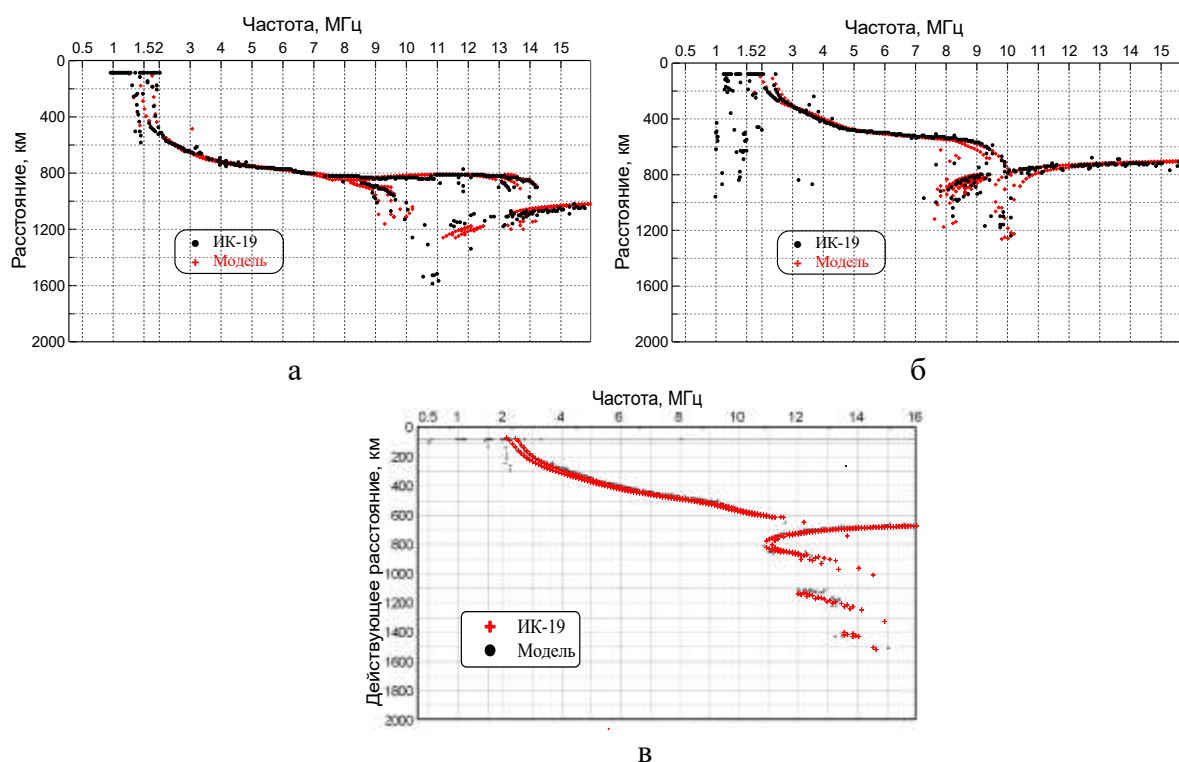


Рис.3. Примеры сложных ионограмм, вызванных влиянием сильных горизонтальных градиентов электронной концентрации.

Распределение электронной концентрации (значения плазменных частот) вдоль траектории движения спутника, описывающее ситуацию возникновения ионограммы рис.3а, и примеры траекторий лучей, регистрируемых на ионограмме, показаны на рис.4.

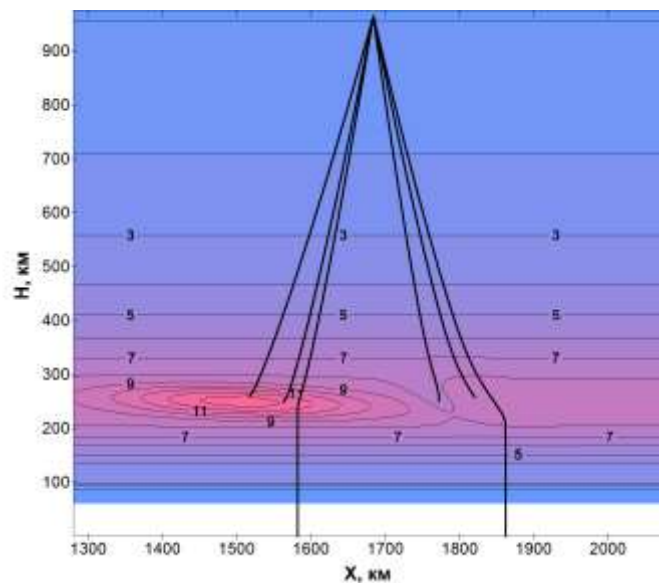


Рис.4. Модель ионосферы и траектории лучей на частотах 9.4, 10.3 и 13.4 МГц для ионограммы на рис.4а.

Результат влияния на ионограмму одновременного присутствия в ионосфере крупно- и мелкомасштабных неоднородностей приведен на рис.5а,б.

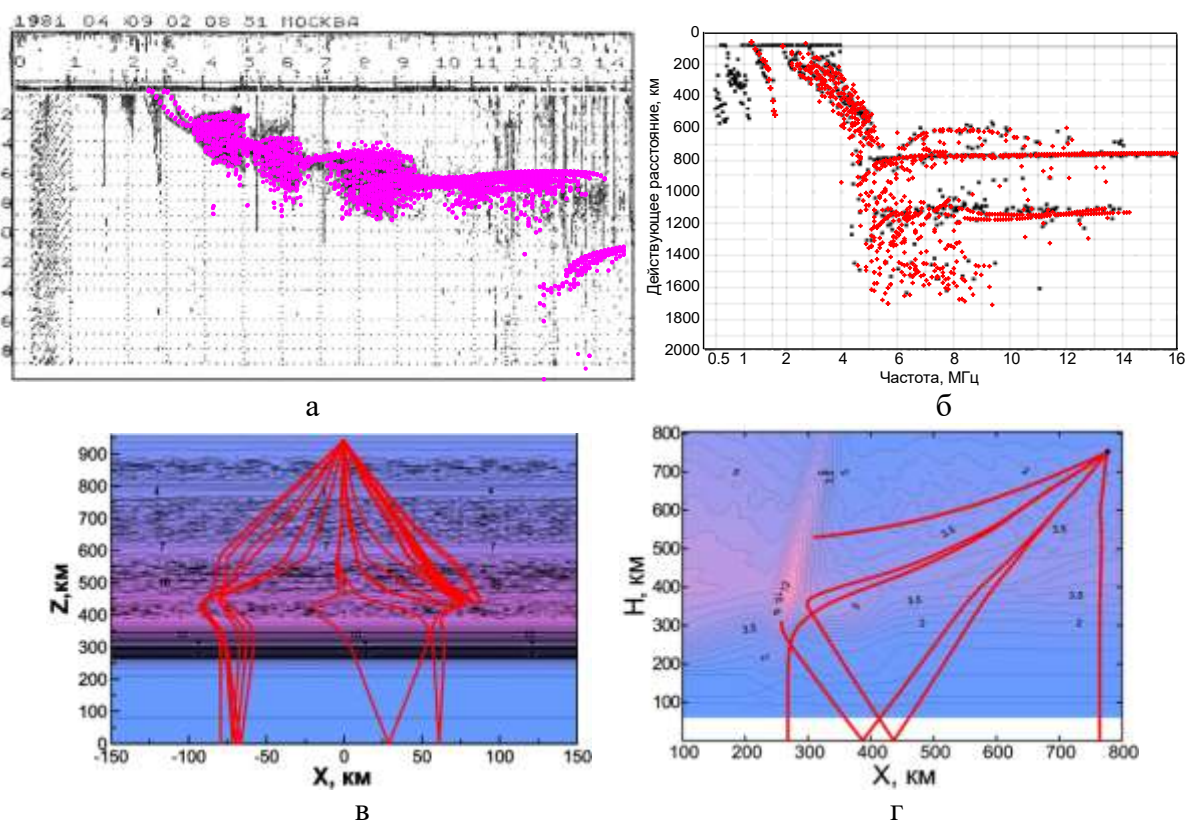


Рис.5. Ионограммы, полученные при наличии в ионосфере неоднородностей различных масштабов (а,б); модель ионосферы и траектории лучей, формирующих ионограммы (в,г).

В случае рис.5а возникновение нескольких крупномасштабных горизонтальных неоднородностей на разных высотах является фактором появления в них мелкомасштабных неоднородных структур. Изолинии плазменных частот для этого случая показаны на рис. 5в. Также там отображены траектории лучей, участвующих в формировании данной ионограммы, на частоте 13 МГц. Аналогично, рис.5г соответствует ситуации ионограммы на рис.5б.

Наличие среднемасштабных неоднородностей с размерами порядка 100 км приводит к появлению ионограмм, представленным на рис.6. Причем неоднородности могут быть расположены как ниже высоты максимума слоя F2 (рис.6а), так и выше (рис.6б). На рис.6в показано распределение электронной концентрации и часть лучей, формирующих ионограмму на рис.6а.

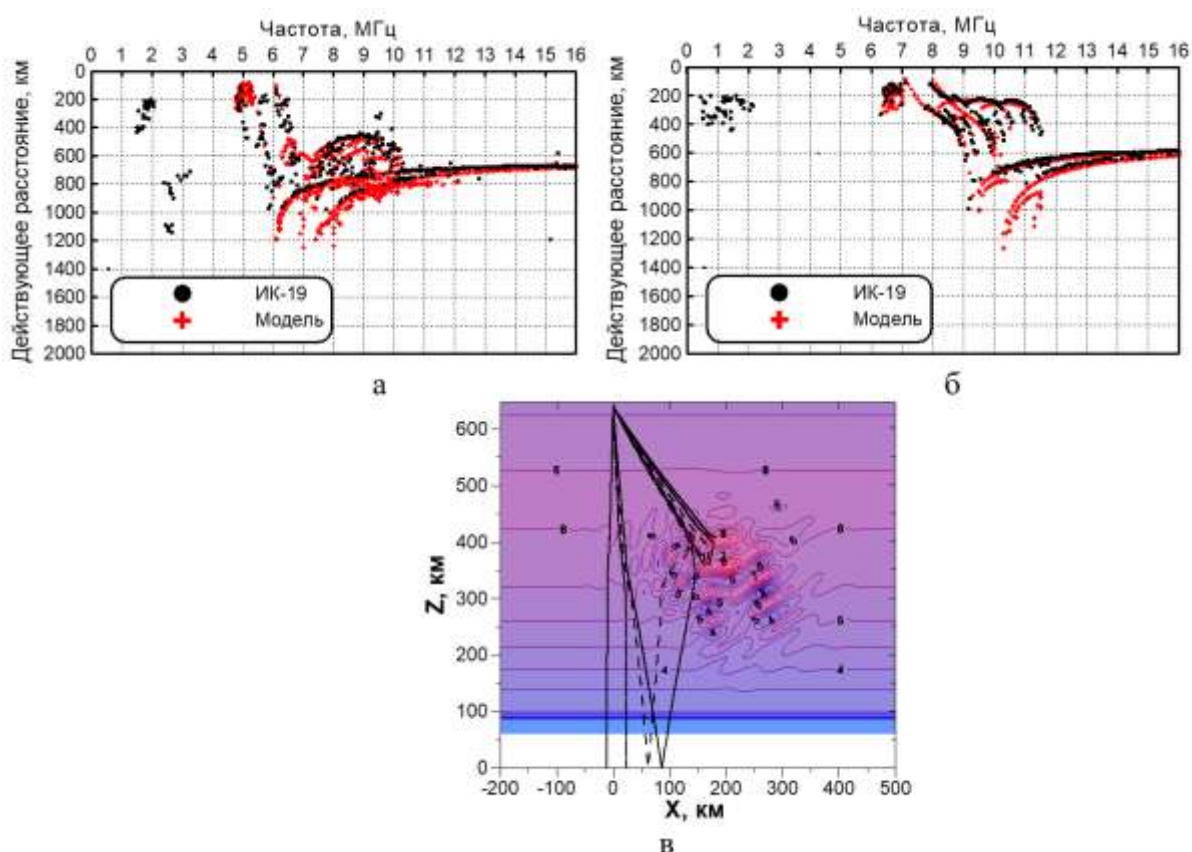


Рис.6. Экспериментальные и модельные ионограммы при наличии в ионосфере среднемасштабных неоднородностей (а, б); модельная ионосфера и примеры лучевых траекторий, формирующих левую модельную ионограмму, на частоте 8 МГц (в).

В процессе интерпретации сложных спутниковых ионограмм была получена статистика наблюдений неоднородностей в зонах экваториальной аномалии и провала, оценены размеры мелких и крупных неоднородностей. Определены особенности ионограмм, связанные с различными типами ионосферных неоднородностей. В большинстве случаев дана информация о механизмах возникновения неоднородностей.

В четвертой главе предложен метод коррекции ионосферной модели на основе результатов экспериментальных данных по зондированию ионосферы, позволяющий максимально приблизить используемую модель к реальной ситуации.

Для коррекции модели, в отличие от других методов, используются не абсолютные значения параметров, а их отличие от «нулевого приближения». Коэффициент коррекции K_i для i -го параметра можно представить как:

$$K_i = \frac{Z_{i\,real}}{Z_{i\,mod}},$$

где $Z_{i\,real}$ и $Z_{i\,mod}$ – экспериментальное и модельное значения этого параметра, соответственно.

Поэтапный план обработки данных заключается в следующем.

1. По всем имеющимся экспериментальным данным (вертикальные, наклонные, внешние ионограммы, транзионограммы, значения ТЕС) определяются основные параметры ионосферных областей, возможные для конкретного типа наблюдений.
2. Для их набора по экспериментальным и модельным значениям рассчитываются коэффициенты коррекции для опорных точек (мест проведения измерений).
3. По полученным коэффициентам коррекции в опорных точках пересчитываются аналогичные коэффициенты для произвольной точки интересующей нас области.

4. Имея все полученные отклонения от модельных параметров, можно восстановить трехмерную картину околоземной плазмы в исследуемом регионе, используя предложенную ионосферную модель.

Для апробации предложенного метода коррекции был проведен модельный комплексный эксперимент по корректировке ионосферной модели IRI над частью территории Европы с использованием различных экспериментальных данных, полученных посредством измерительного комплекса «ионосферные станции–спутник», включающих:

- ионограммы ВЗ наземных ионозондов;
- ионограммы внешнего зондирования со спутника;
- наклонную ионограмму между наземными ионозондами;
- транзионограммы «спутник-ионозонд».

Результаты коррекции для параметра f_oF2 отражены на рис.7. По другим основным параметрам получены аналогичные результаты.

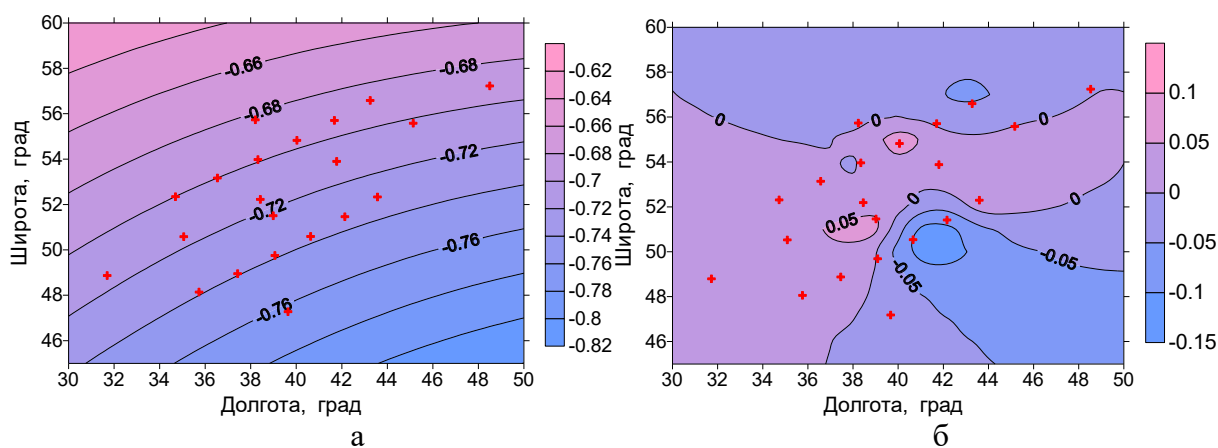


Рис.7. Разница между значениями критических частот слоя F2 «начального приближения» и реальными (а); отклонения критических частот, рассчитанных предложенным методом, от истинных (б).

Для оценки эффективности работы предложенного метода коррекции модели ионосферы использовалось сравнение экспериментальных наклонных ионограмм, полученных на различных трассах, с результатами моделирования как для ионосферной модели, задаваемой по умолчанию, так

и после применения к ней процедуры коррекции. Результаты показаны на рис.8-10.

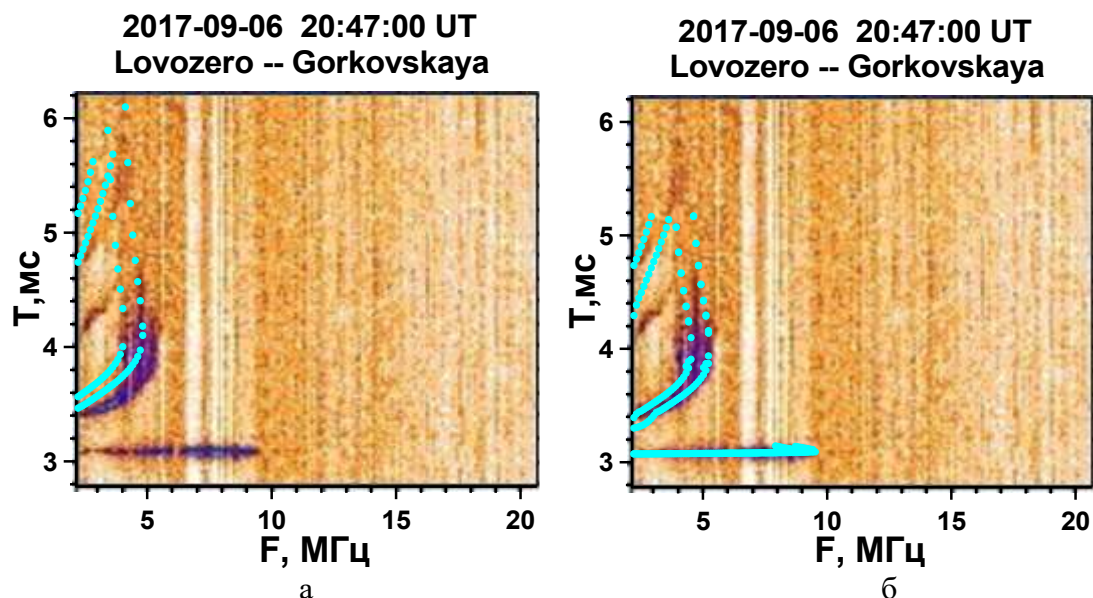


Рис.8. Сравнение модельных ионограмм на короткой трассе (950 км), рассчитанных по модели IRI-2016 (а) и после применения к ней процедуры корректировки (б), с экспериментальной. Результаты моделирования выделены голубым цветом.

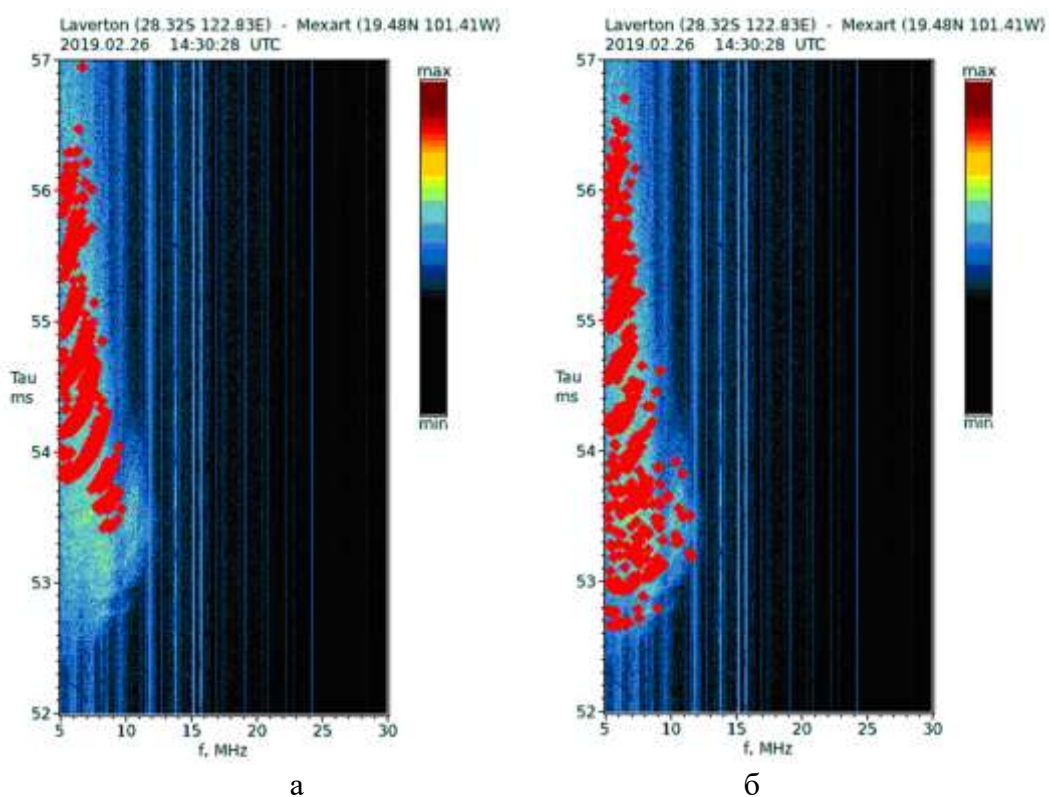


Рис.9. Сравнение модельных ионограмм на длинной трассе (более 15000 км), рассчитанных по модели IRI-2016 (а) и после применения к ней процедуры корректировки (б), с экспериментальной. Результаты моделирования выделены красным цветом.

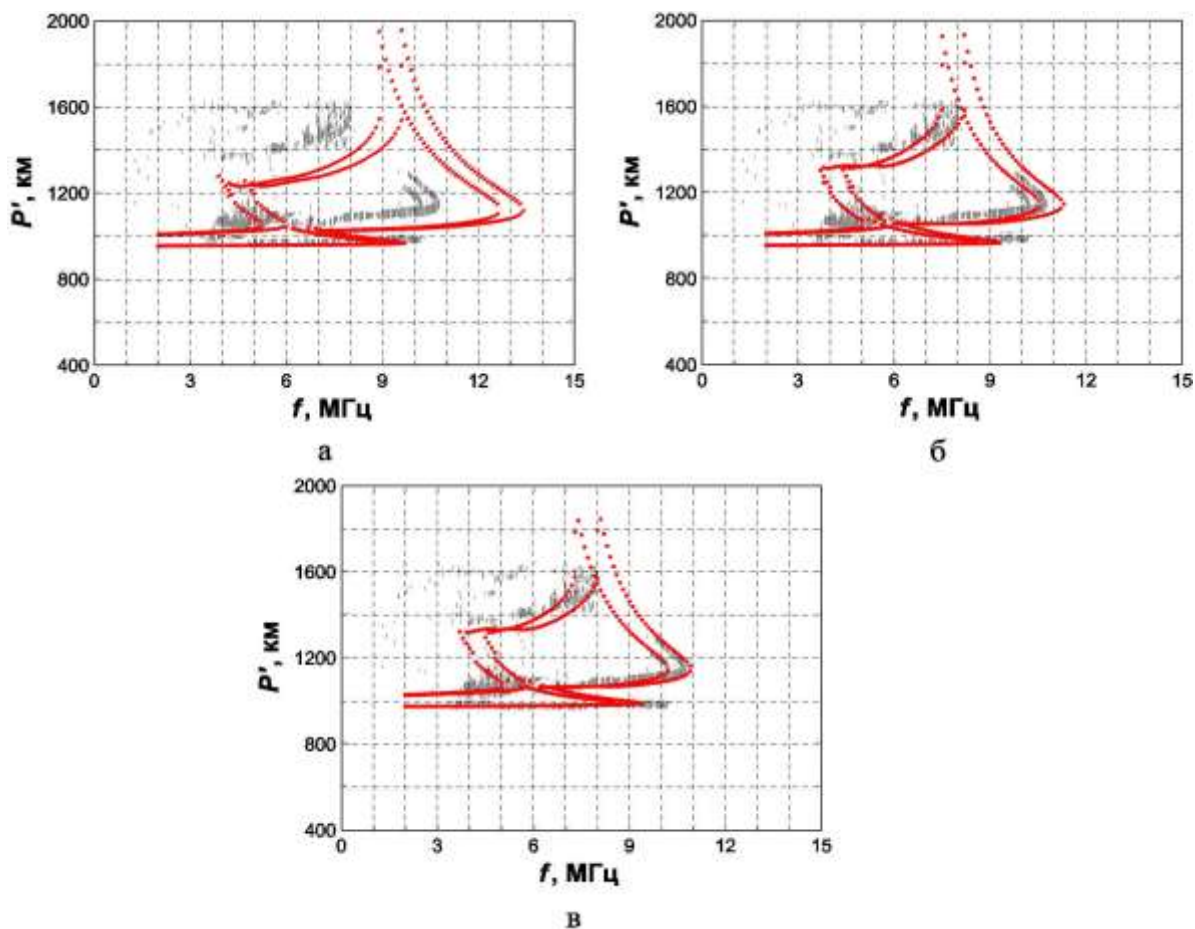


Рис.10. Сравнение различных модельных ионограмм (изображены точками) с реальной наклонной ионограммой на трассе Москва-Ростов в сеансе 07:00UT 14.02.2013г.: а – «нулевое приближение», б – коррекция по одной станции, в – коррекция по двум станциям.

Кроме того, рис.10 демонстрирует влияние количества пунктов получения экспериментальных данных на качество результатов коррекции.

Т.о., проверка работы предложенного метода, проведенная как при корректировке модельной ионосферы над частью территории Европы, так и при сравнении экспериментальных и модельных наклонных ионограмм, показывает практически полное соответствие. Использование предложенной процедуры коррекции вместе с моделью IRI-2016 при обработке данных наклонного зондирования оказалось эффективным для трасс различной протяженности, как в спокойных условиях, так и в период достаточно сильного возмущения.

В **пятой главе** предлагаются методы спутникового трансionoсферного зондирования (ТИЗ), обладающие большим разнообразием, как по высотам орбит спутников, так и по расположению передающих и приемных систем. Особое внимание к этому вопросу вызвано тем фактом, что в настоящее время в нашей стране выведены на орбиту первые два космических аппарата с бортовым ионозондом из состава космического комплекса «Ионосфера-М». Поэтому важной задачей является разработка таких методов применительно к будущим экспериментам.

В **разделе 5.1** приводятся общие принципы моделирования ионограмм трансionoсферного и обратного трансionoсферного (ОТИЗ) зондирования и связанные с этим особенности траекторных расчетов и задания среды распространения, вводится понятие подконтрольной области пространства (зоны «ответственности»). Показано, что в рассмотрении необходимо учитывать также лучи с отражением от Земли.

Раздел 5.2 посвящен анализу возможности диагностики наличия ионосферных неоднородностей с использованием ТИЗ и ОТИЗ. На основании моделирования можно утверждать, что вывод о наличии неоднородных структур в области наблюдения делается достаточно уверенно по данным одиночной ионограммы ТИЗ. В то же время набор последовательных трансionoграмм совместно с численным моделированием позволяет не только обнаружить наличие одной или нескольких неоднородностей, но и дает возможность определить такие их параметры, как местоположение, размеры, скорости перемещения.

В **разделе 5.3** исследуются вопросы, связанные с диагностикой ионосферы с использованием двух КА. Они могут быть оба расположены на низких круговых орбитах (например, связка МКС–«Прогресс»), либо один из них может находиться на высокоапогейной орбите. Схема такого эксперимента с использованием двух аппаратов на разных высотах приведена на рис.11.

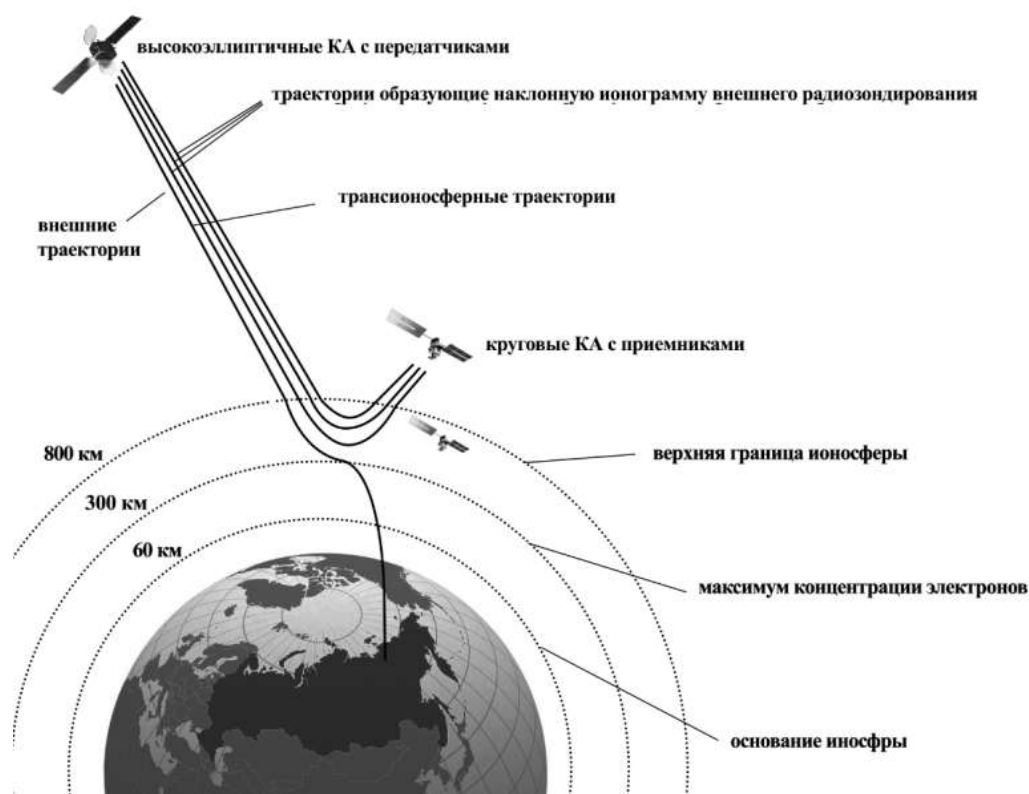


Рис.11. Схема зондирования ионосферы комплексом из двух ионозондов в режиме внешнего и трансионосферного зондирования. Высокоэллиптическая орбита – от 15000 до 40000 км, круговая орбита от 600 до 2000 км

Проведенные модельные эксперименты показывают, что такой комплекс, по сравнению с использованием одного КА, позволяет расширить, как количественно, так и качественно, объем получаемой информации о состоянии ионосферы. В зависимости от взаимного положения ИСЗ. К ним, в частности, относится определение спорадического слоя Es, диагностика неоднородных ионосферных структур, значительное расширение области наблюдения и т.д.

В разделе 5.4 исследуются вопросы, связанные с влиянием ионосферы на точность работы спутниковых навигационных систем. На основе численного моделирования показывается, что использование упрощенной модели ионосферы и метода траекторных расчетов приводит к появлению систематической погрешности. По результатам моделирования делается вывод, что присутствие в ионосфере крупномасштабных неоднородностей может привести к ошибке определения местоположения более 50 м. Этот

эффект одновременно может служить альтернативным способом диагностики неоднородных структур.

Т.о., по результатам данной главы можно сделать вывод о том, что предлагаемый вид ионосферного зондирования имеет широкие диагностические возможности. Показано, что наибольший эффект следует ожидать от комплексного использования трансionoграмм на сети приемных станций, а также ионограмм вертикального и наклонного зондирования. Сделан вывод, что для улучшения точности работы спутниковых навигационных систем необходимо учитывать реальное распределение электронной концентрации в ионосфере, а полученные данные можно использовать для диагностики крупномасштабных неоднородностей.

В **шестой главе** исследуются возможности использования полного электронного содержания ТЕС для определения состояния ионосферы. Показано, что ТЕС ионосферы позволяет выявлять климатологические особенности состояния ионосферы и описывать это состояние во время возмущений. Предложенный способ использования ТЕС позволяет увеличить точность определения критических и, соответственно, максимальных применимых частот по сравнению с современными эмпирическими моделями ионосферы. Результаты тестирования показывают, что это достигается с помощью параметра экспериментальной медианы эквивалентной толщины ионосферы $\tau(med)$, которая является коэффициентом пропорциональности между ТЕС и NmF2: $TEC = \tau * NmF2$. Предложено в качестве τ вместо модельного значения $\tau(IRI) = TEC(IRI)/NmF2(IRI)$ использовать медиану $\tau(med) = med(TEC(obs)/NmF2(obs))$, рассчитанную по экспериментальным значениям $TEC(obs)$ и $NmF2(obs)$.

Также предложена формула для определения адаптированной частоты $foF2$

$$foF2(adapt) = foF2(IRI) * \sqrt{\frac{TEC(obs)}{TEC(IRI) * K(\tau)}}$$

Основное отличие от стандартной формулы, используемой при расчетах, заключается в наличии коэффициента $K(\tau)$. Этот коэффициент включает отличие $\tau(obs)$ от $\tau(IRI)$.

Анализ большого объема экспериментальных данных показывает, что:

- коэффициент $K(\tau)$ практически всегда отличен от 1, т.е. имеется неточность в определении $foF2$;
- в силу пространственной корреляции τ медиана $\tau(med)$, рассчитанная по данным одной станции, может использоваться для улучшения определения $foF2$ в некотором радиусе.

Также в этой главе проведен анализ используемых в настоящее время глобальных карт распределения TEC GIM-IGS, таких как JPL, CODE, UPC, ESA, и констатированы большие отличия между ними. Путем сравнения результатов, полученных при их использовании, с экспериментом сделан вывод о предпочтительном использовании карт JPL. Анализ сравнения эмпирических моделей TEC (Klobuchar и NTCM) и моделей, основанных на интегрировании $N(h)$ -профиля (IRI, IRI-Plas, NeQuick), также не позволяет выявить наиболее точную.

Основные результаты

1. Показано, что метод характеристик можно использовать как основной метод численного моделирования распространения КВ-радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере, представлена методика моделирования, включающая алгоритмы расчета траекторий методом характеристик, в том числе с учетом особенностей решения уравнений для крутопадающих на ионосферу лучей. Детально описано решение граничной задачи. Рассмотрены способы

численного задания ионосферных неоднородностей различных типов, позволяющие учитывать их при моделировании.

2. Разработаны новые методы восстановления профиля электронной концентрации по экспериментальным данным наземного вертикального и спутникового зондирования. Детально представлены принципы построения, алгоритмы, результаты функционирования нового инструмента dynasonde-21 и соответствующая программа NeXtYZ, позволяющая наиболее точно определять трехмерную структуру распределения электронной концентрации. Подробно описан разработанный программный комплекс «Viewer_DPS4» – новый инструмент обработки и анализа данных ионозонда DPS-4, включающий в себя алгоритмы автоматизированного расчета F-рассеяния и детального анализа отраженных эхо-сигналов.
3. Предложены схемы интерпретации сложных ионограмм ИСЗ Интеркосмос-19, связанных с наличием ионосферных неоднородностей, полученные на основе численного моделирования, с примерами конкретных уникальных результатов: на ионограммах внешнего зондирования были обнаружены такие ранее неизвестные следы, как наклонные отражения от Земли, задержанный нижний след, рассеянные и многократные следы, жемчужины, волноводные следы. Получена статистика наблюдений неоднородностей в зонах экваториальной аномалии, провала. Оценены размеры мелких и крупных неоднородностей.
4. Разработан метод коррекции ионосферной модели на основе результатов комплексного зондирования ионосферы, позволяющий максимально приблизить модель к реальной ситуации. Проверка его работоспособности, проведенная как для численного моделирования корректировки ионосферы над частью территории Европы, так и при сравнении экспериментальных и модельных наклонных ионограмм,

дает практически точные результаты. Использование предложенной процедуры коррекции вместе с моделью IRI-2016 при обработке данных наклонного зондирования оказалось эффективным для трасс различной протяженности, как в спокойных условиях, так и в период достаточно сильного возмущения.

5. Рассмотрены спутниковые методы трансionoсферного зондирования (ТИЗ), обладающие большим разнообразием, как по высотам орбит спутников, так и по расположению передающих и приемных систем. Основной задачей являлась разработка методов применительно к будущим экспериментам. Выявлены широкие диагностические возможности данного вида ионосферного зондирования. Показано, что наибольший эффект следует ожидать от совместного использования трансionoграмм и ионограмм вертикального и наклонного зондирования. Исследовано влияние неоднородных структур на точность позиционирования систем ГНСС.
6. Предложен способ определения состояния ионосферы по значению полного электронного содержания ТЕС. Показано, что ТЕС ионосферы позволяет выявлять климатологические особенности состояния ионосферы и описывать это состояние во время возмущений. Использование ТЕС позволяет увеличить точность определения критических и, соответственно, максимальных применимых частот по сравнению с современными эмпирическими моделями ионосферы. Результаты тестирования показали сильное различие между значениями экспериментальной медианы эквивалентной толщины ионосферы $\tau(\text{med})$ и значениями эквивалентной толщины современных эмпирических моделей (например, IRI, IRI-Plas, NeQuick), что позволило сделать вывод о важности использования $\tau(\text{med})$ для увеличения этой точности.

7.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Оценка полного электронного содержания ионосферы с использованием измерений плазменных частот на спутниках / О. А. Мальцева, Г. А. Жбанков, Н. С. Можаяева, Н. В. Никитенко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19, № 5. – С. 56-61. К2
2. Денисенко, П. Ф. Влияние крупномасштабных ионосферных неоднородностей на энергетические характеристики ВЧ-радиоволн вблизи границы мертвой зоны / П. Ф. Денисенко, А. И. Сказик, Г. А. Жбанков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2015. – Т. 20, № 6. – С. 14-19. К2
3. Жбанков, Г. А. Сравнительный анализ численных методов, применимых для расчета траекторных характеристик КВ-радиотрасс / Г. А. Жбанков, М. М. Анишин // Техника радиосвязи. – 2016. – № 4(31). – С. 40-51. К3
4. Жбанков, Г. А. Взаимодействие электромагнитных волн коротковолнового диапазона с мелкомасштабными ионосферными неоднородностями полярной ионосферы (часть I) / Г. А. Жбанков, Н. П. Данилкин // Техника радиосвязи. – 2020. – № 2(45). – С. 18-32. – DOI 10.33286/2075-8693-2020-45-18-32. К3
5. Жбанков, Г. А. Разработка методик расчетов N(h)-профилей ионосферы на основе данных ионограмм вертикального зондирования / Г. А. Жбанков // Техника радиосвязи. – 2020. – № 3(46). – С. 7-18. – DOI 10.33286/2075-8693-2020-46-7-18. К3
6. Жбанков, Г. А. Взаимодействие электромагнитных волн КВ-диапазона с мелкомасштабными ионосферными неоднородностями полярной ионосферы (часть II) / Г. А. Жбанков, Н. П. Данилкин // Техника радиосвязи. – 2020. – № 4(47). – С. 45-55. – DOI 10.33286/2075-8693-2020-47-45-56. К3
7. Анишин, М. М. Расчет поляризационных потерь при планировании радиолиний коротковолнового диапазона (часть 1) / М. М. Анишин, Г. А. Жбанков // Техника радиосвязи. – 2021. – №2(49). – С. 42-52. – DOI 10.33286/2075-8693-2021-49-42-52. К3
8. Анишин, М. М. Расчет поляризационных потерь при планировании радиолиний коротковолнового диапазона (часть 2) / М. М. Анишин, Г. А. Жбанков // Техника радиосвязи. – 2021. – № 3(50). – С. 17-28. – DOI 10.33286/2075-8693-2021-50-17-28. К3
9. Жбанков, Г. А. Программный комплекс "Viewer_DPS4" - инструмент обработки и анализа данных ионозонда DPS-4 / Г. А. Жбанков, М. М.

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

10. Zabotin, N. A. NeXtYZ: Three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms / N. A. Zabotin, J. W. Wright, G. A. Zhbakov // Radio Science. – 2006. – Vol. 41, No. 6. – P. RS6S32. – DOI 10.1029/2005RS003352. К1
11. Specific propagation of radiowaves from the Intercosmos-19 satellite in the region of the nighttime equatorial anomaly crest / G. A. Zhbakov, A. T. Karpachev, V. A. Telegin, K. G. Tsybulya // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50, No. 1. – P. 119-126. – DOI 10.1134/S0016793210010135. [Русскоязычная версия: Особенности распространения радиоволн со спутника "Интеркосмос-19" в области гребня ночной экваториальной аномалии / Г. А. Жбанков, А. Т. Карпачев, В. А. Телегин, К. Г. Цыбуля // Геомагнетизм и аэрномия. – 2010. – Т. 50, № 1. – С. 123-130.]. К1
12. Maltseva, O. A. Improvement of the real time total electron content based on the International Reference Ionosphere model / O. A. Maltseva, G. A. Zhbakov, T. Trinh Quang // Advances in Space Research. – 2010. – Vol. 46, No 8. – P. 1008-1015. – DOI 10.1016/j.asr.2010.06.011. К1
13. Maltseva, O. A. Effectiveness of using correcting multipliers in calculations of the total electron content according to the IRI2007 model / O. A. Maltseva, G. A. Zhbakov, T. V. Nikitenko // Geomagnetism and Aeronomy. – 2011. – Vol. 51, No. 4. – P. 492-500. – DOI 10.1134/S0016793211030133. [Русскоязычная версия: Мальцева, О. А. Оценки эффективности использования корректирующих множителей в расчетах ПЭС по модели IRI 2007 / О. А. Мальцева, Г. А. Жбанков, Т. В. Никитенко // Геомагнетизм и аэрномия. – 2011. – Т. 51, № 4. – С. 498-507.]. К1
14. Karpachev, A. T. Detection of a large-scale irregularity in the region of the main ionospheric trough according to the data of topside sounding on board the Intercosmos-19 satellite / A. T. Karpachev, V. A. Telegin, G. A. Zhbakov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – Vol. 52, No. 2. – P. 204-210. – DOI 10.1134/S0016793212020065. [Русскоязычная версия: Карпачев, А. Т. Выделение крупномасштабной неоднородности в области главного ионосферного провала по данным внешнего зондирования на ИСЗ "Интеркосмос-19" / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэрномия. – 2012. – Т. 52, № 2. – С. 219-225.]. К1
15. Possibilities of radio sounding of the ionosphere in the decameter range on board a geostationary satellite / G. V. Givishvili, I. V. Krashennnikov, N. P. Danilkin, G. A. Zhbakov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – Vol. 52, No. 4. – P. 491-496. – DOI 10.1134/S0016793212040032. [Русскоязычная версия: Возможность радиозондирования ионосферы в декаметровом

диапазоне с борта геостационарного ИСЗ / Г. В. Гивишвили, Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, И. В. Крашенинников // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 519-524.]. K1.

16. Latitudinal structure of the equatorial F3 layer based on Intercosmos-19 topside sounding data / A. T. Karpachev, V. A. Telegin, M. V. Klimenko [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2012. – Vol. 77. – P. 186-193. – DOI 10.1016/j.jastp.2011.12.018. K1.

17. Karpachev, A. T. Distant earthly reflections on ionograms of the intercosmos-19 satellite / A. T. Karpachev, V. A. Telegin, G. A. Zhbankov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53, No. 6. – P. 761-768. – DOI 10.1134/S0016793213050083. [Русскоязычная версия: Карпачев, А. Т. Удаленные земные отражения на ионограммах ИСЗ "Интеркосмос-19" / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2013. – Т. 53, № 6. – С. 809-816. – DOI 10.7868/S0016794013050088.]. K1.

18. Use of TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances / O. A. Maltseva, N. S. Mozhaeva, O. S. Poltavsky, G. A. Zhbankov // Advances in Space Research. – 2012. – Vol. 49, No. 6. – P. 1076-1087. – DOI 10.1016/j.asr.2012.01.005. K1

19. Maltseva, O. A. Advantages of the new model of IRI (IRI-Plas) to simulate the ionospheric electron density: Case of the European area / O. A. Maltseva, G. A. Zhbankov, N. S. Mozhaeva // Advances in Radio Science. – 2013. – Vol. 11. – P. 307-311. – DOI 10.5194/ars-11-307-2013. K1

20. Karlachev, A. T. Pearl diffuse structures on ionograms of Intercosmos-19 associated with irregularities of the low-latitude ionosphere / A. T. Karlachev, V. A. Telegin, G. A. Zhbankov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54, No. 1. – P. 59-64. – DOI 10.1134/S0016793214010046. [Русскоязычная версия: Карпачев, А. Т. Диффузные структуры типа “жемчужин” на ионограммах ИСЗ "Интеркосмос-19", связанные с неоднородностями низкоширотной ионосферы / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2014. – Т. 54, № 1. – С. 65-70. – DOI 10.7868/S0016794014010040.]. K1.

21. Transionospheric radiosounding with allowance for the reflection of radiowaves from the earth / N. P. Danilkin, S. V. Zhuravlev, N. G. Kotonaeva, G. A. Zhbankov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54, No. 4. – P. 468-479. – DOI 10.1134/S0016793214040124. [Русскоязычная версия: Трансионосферное радиозондирование с учетом отражения радиоволн от Земли / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев, Н. Г. Котонаева // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2014. – Т. 54, № 4. – С. 508-519. – DOI 10.7868/S0016794014040130.]. K1.

22. Karpachev, A. T. Waveguide radio-wave propagation in the equatorial ionosphere according to the Interkosmos-19 data / A. T. Karpachev, V. A. Telegin, G. A. Zhbankov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54, No. 2. – P. 207-215. – DOI 10.1134/S0016793214020108. [Русскоязычная версия:

Карпачев, А. Т. Волноводное распространение радиоволн в экваториальной ионосфере по данным ИСЗ "Интеркосмос-19" / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2014. – Т. 54, № 2. – С. 221-230. – DOI 10.7868/S0016794014020102.]. K1.

23. Guided radio-wave propagation in the equatorial ionosphere according to the topside sounding onboard Interkosmos-19 / A. T. Karpachev, V. P. Kuleshova, V. A. Telegin, G. A. Zhibankov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2014. – Vol. 121, No. PA. – P. 89-97. – DOI 10.1016/j.jastp.2014.10.008. K1.

24. Karpachev, A. T. Region of permanent generation of large-scale irregularities in the daytime winter ionosphere of the Southern Hemisphere / A. T. Karpachev, V. A. Telegin, G. A. Zhibankov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2016. – Vol. 56, No. 1. – P. 64-71. – DOI 10.1134/S0016793215060043. [Русскоязычная версия: Карпачев, А. Т. Область постоянной генерации крупномасштабных неоднородностей в дневной зимней ионосфере южного полушария / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 69. – DOI 10.7868/S0016794015060048.]. K1.

25. Karpachev, A. T. Scattered reflections and multiple traces in the range of 7–10 MHz on ionograms of the interkosmos-19 satellite / A. T. Karpachev, G. A. Zhibankov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2017. – Vol. 57, No. 4. – P. 442-450. – DOI 10.1134/S0016793217040090. [Русскоязычная версия: Карпачев, А. Т. Рассеянные отражения и множественные следы в интервале 7-10 МГц на ионограммах ИСЗ "Интеркосмос-19" / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 481-489. – DOI 10.7868/S0016794017040095.]. K1.

26. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere / I. A. Nosikov, M. V. Klimenko, P. F. Bessarab, G. A. Zhibankov // Advances in Space Research. – 2018. – Vol. 60, No. 2. – P. 491-497. – DOI 10.1016/j.asr.2018.02.028.

27. Spread F in the Midlatitude Ionosphere According to DPS-4 Ionosonde Data / V. A. Panchenko, V. A. Telegin, V. I. Rozhdestvenskaya [et al.] // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. – Vol. 58, No. 2. – P. 229-236. – DOI 10.1134/S0016793218020160. [Русскоязычная версия: F-рассеяние в среднеширотной ионосфере по данным ионозонда DPS-4 / В. А. Панченко, В. А. Телегин, В. Г. Воробьев [и др.] // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2018. – Т. 58, № 2. – С. 241-249. – DOI 10.7868/S0016794018020104.]. K1.

28. On Continuous Observations of Thin Walls of High-Density Plasma in the High-Latitude Ionosphere from Arktika-M Satellites / N. P. Danilkin, V. B. Lapshin, M. Y. Filippov, G. A. Zhibankov // Solar System Research. – 2018. – Vol. 52, No. 7. – P. 699-705. – DOI 10.1134/S0038094618070055. K1

29. Radiosounding of the High-Latitude Ionosphere with the Arktika-M Hydrometeorological Complex / N. P. Danilkin, S. V. Zhuravlev, N. G.

Kotonaeva [et al.] // Solar System Research. – 2018. – Vol. 52, No. 7. – P. 684-690. – DOI 10.1134/S0038094618070043. K1

30. Blagoveshchensky, D. V. Observed and Calculated Ionograms of Oblique Ionospheric Sounding on HF Radio Paths During a Magnetic Storm of September 7–8, 2017 / D. V. Blagoveshchensky, G. A. Zhbakov, O. A. Maltseva // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 61, No. 12. – P. 881-892. – DOI 10.1007/s11141-019-09944-3. K1

31. Zhbakov, G. A. Correction of Ionosphere Models Based on Ground Ionosonde Data / G. A. Zhbakov, P. F. Denisenko, V. V. Sotsky // Geomagnetism and Aeronomy. – 2019. – Vol. 59, No. 6. – P. 704-712. – DOI 10.1134/S001679321906015X. [Русскоязычная версия: Жбанков, Г. А. Коррекция моделей ионосферы по данным сети наземных ионозондов / Г. А. Жбанков, П. Ф. Денисенко, В. В. Соцкий // Геомагнетизм и аэрномия. – 2019. – Т. 59, № 6. – С. 750-758. – DOI 10.1134/S0016794019060154.]. K1

32. Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic Identification of High and Low Rays / I. A. Nosikov, M. V. Klimenko, G. A. Zhbakov [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68, No. 1. – P. 455-467. – DOI 10.1109/TAP.2019.2938817. K1

33. Karpachev, A. T. Additional Horizontal Traces of Ground Reflections on Ionograms from the Interkosmos-19 Satellite in the Night Trough / A. T. Karpachev, G. A. Zhbakov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2020. – Vol. 60, No. 1. – P. 58-62. – DOI 10.1134/S0016793220010065. [Русскоязычная версия: Карпачев, А. Т. Дополнительные горизонтальные следы земных отражений на ионограммах ИСЗ "Интеркосмос-19" в области ночного провала / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков // Геомагнетизм и аэрномия. – 2020. – Т. 60, № 1. – С. 61-65. – DOI 10.31857/S001679402001006X.]. K1

34. Satellite model of foF2 in winter high-latitude ionosphere describing the trough structure / A. T. Karpachev, L. V. Pustovalova, M. V. Klimenko [et al.] // Advances in Space Research. – 2021. – DOI 10.1016/j.asr.2021.07.014. K1

35. Zhbakov, G. A. Influence of the ionosphere on the accuracy of the satellite navigation system / G. A. Zhbakov, O. A. Maltseva, N. P. Danilkin // Acta Astronautica. – 2022. – Vol. 190. – P. 194-201. – DOI 10.1016/j.actaastro.2021.10.004. K1

36. On the Similarity Between the Orientation of the Cross-Field Anisotropy of Small-Scale Irregularities and the Direction of the Plasma Drift in the Ionosphere Over Moscow / V. A. Telegin, V. A. Panchenko, N. Y. Romanova, G. A. Zhbakov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 64, No. 8-9. – P. 618-628. – DOI 10.1007/s11141-022-10164-5. [Русскоязычная версия: О сходстве между ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направлением дрейфа плазмы в ионосфере над Москвой / В. А. Телегин, Н. Ю. Романова, Г. А. Жбанков, В. А. Панченко // Известия

высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 686-697. – DOI 10.52452/00213462_2021_64_08_686.]

37. Relationship between the Drift of Medium-Scale Irregularities and the Orientation of Transverse Anisotropy of Small-Scale Irregularities in the F Region of the Midlatitude Ionosphere / N. Y. Romanova, V. A. Telegin, V. A. Panchenko, G. A. Zhbakov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2022. – Vol. 62, No. 1-2. – P. 71-85. – DOI 10.1134/S0016793222020128. [*Русскоязычная версия*: Взаимосвязь дрейфа среднемасштабных неоднородностей и ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы / Н. Ю. Романова, В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков // Геомагнетизм и аэронаука. – 2022. – Т. 62, № 2. – С. 211-226. – DOI 10.31857/S0016794022020134.]. K1.

38. Comparing the Orientation of the Cross-Field Anisotropy of Small-Scale Inhomogeneities and Direction of Drift in the F-Layer over the Moscow Region (January–March 2012) / N. Y. Romanova, V. A. Telegin, V. A. Panchenko, G. A. Zhbakov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – Vol. 86, No. 3. – P. 316-322. – DOI 10.3103/S1062873822030200. [*Русскоязычная версия*: Результат сопоставления ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направления дрейфа в F-области над Московским регионом (в период январь–март 2012 г.) / Н. Ю. Романова, В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86, № 3. – С. 393-400. – DOI 10.31857/S0367676522030206.]

39. Zhbakov, G. Accounting for small-scale irregularities in the propagation of short radio waves in the high-latitude ionosphere / G. Zhbakov, O. Maltseva // Proceedings on Engineering Sciences. – 2023. – Vol. 5, No. 1. – P. 97-104. – DOI: 10.24874/PES05.01.009. K1.

40. Local Variations in the Orientation of Transverse Anisotropy and the Direction of Drift in the F-Region of the Mid-Latitude Ionosphere / N. Yu. Romanova, V. A. Telegin, V. A. Panchenko, G. A. Zhbakov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Vol. 88, No. 3. – P. 386-393. – DOI 10.1134/S1062873823705561. [*Русскоязычная версия*: Локальные вариации ориентации поперечной анизотропии и направление дрейфа в F-области среднеширотной ионосферы / Н. Ю. Романова, В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2024. – Т. 88, № 3. – С. 451-459. – DOI 10.31857/S0367676524030159.]

Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ

41. Барабашов, Б. Г. Трехмерная модель поля ВЧ радиоволн / Б. Г. Барабашов, М. М. Анишин, Г. А. Жбанков. // Антенны. – 2004. – №12. – С. 70-74.

42. Жбанков, Г. А. Восстановление трехмерного распределения электронной концентрации ионосферы по ионограммам dynasonde-21 / Г. А. Жбанков, Н. А. Заботин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2009. – № 2(150). – С. 52-56.
43. Трансионосферное радиозондирование - последовательность ионограмм при одном прохождении ИСЗ над наземной станцией / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев, Н. Г. Котонаева // Гелиогеофизические исследования. – 2012. – № 2. – С. 14-22.
44. Данилкин, Н. П. Восстановление трёхмерного поля плотности электронов по результатам модельного эксперимента с участием бортового ионозонда и двух наземных ионозондов / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Тасенко // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 6. – С. 53-63.
45. Карпачев, А. Т. Неоднородная структура ионосферы по данным спутника "Интеркосмос-19" / А. Т. Карпачев, В. А. Телегин, Г. А. Жбанков // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8-2. – С. 317-320.
46. Мониторинг ионосферы в Арктике на основе спутниковых ионозондов / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев [и др.] // Гелиогеофизические исследования. – 2016. – № 14. – С. 31-45.
47. Жбанков, Г. А. Особенности решения лучевых уравнений для крутопадающих на ионосферу траекторий / Г. А. Жбанков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 2 (190). – С. 86-90.
48. Автоматизированная обработка данных F-рассеяния / В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков, В. И. Рождественская // Physics of Auroral Phenomena. – 2016. – Т.39, № 1. – С. 130-133.
49. Радиозондирование высокоширотной ионосферы с гидрометеорологического комплекса «Арктика-М» / Н. П. Данилкин, С. В. Журавлёв, Н. Г. Котонаева [и др.] // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2017. – № 3(37). – С. 103-109.
50. Определение критической частоты слоя ионосферы F2 над Арктикой по данным трансионограмм, полученным с высокоапогейных спутников / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, В. Б. Лапшин [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 5(98). – С. 140-149.
51. Некоторые особенности построения трансионограмм, получаемых с борта высокоапогейных спутников / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, А. Ю. Репин [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2018. – № 3(102). – С. 46-52.
52. Новый подход к решению задачи повышения точности GPS-позиционирования / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, Н. Г. Котонаева, В. Б. Лапшин // Гелиогеофизические исследования. – 2019. – № 22. – С. 1-13.
53. Трансионосферное радиозондирование как основа оперативного прогноза для совершенствования коротковолновой радиосвязи / Н. П.

Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев [и др.] // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2020. – № 4(50). – С. 76-83. – DOI: 10.31857/S0367676524030159

54. Данилкин, Н. П. Радиозондирование ионосферы. От первых ионозондов к современному состоянию / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков // Гелиогеофизические исследования. – 2021. – № 30. – С. 30-34. – DOI 10.54252/2304-7380_2021_30_30.

Публикации в сборниках трудов конференций

55. Интерпретация двойных слоев на ионограммах ИСЗ Интеркосмос-19 в области гребня экваториальной аномалии / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин, К. Г. Цыбуля // Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ-2009 : труды Международной научной конференции, Таганрог-Дивноморское, Россия, 27 июня - 1 июля 2009 г. : сборник докладов / Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Южный федеральный университет" в г. Таганроге. – Ростов-на-Дону, 2009. – С. 581-585.

56. Maltseva, O. A. Comparison of the improved TEC model based on IRI with experimental data / O. A. Maltseva, G. A. Zhbakov, Q. T. Trinh // 11th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques 2009 (IRST 2009), Edinburgh, Scotland, United Kingdom 28-30 April 2009. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; Curran Associates, Inc., 2010. – P. 245-249. – DOI 10.1049/cp.2009.0072.

57. Using satellite data for monitoring ionospheric propagation conditions / O. A. Maltseva, N. S. Mozhaeva, T. V. Nikitenko, G. A. Zhbakov // 13th International Ionospheric Effects Symposium Alexandria, IES2011, Virginia, May 17-19, 2011 / J. M. Goodman, R. McCoy, J. R. Hansen (eds.). – USA, 2011. – P. 594-601. – URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2011113661.xhtml> (data access 25.06.2025)

58. Maltseva, O. Global TEC maps and the best version of the empirical N (h)-model / O. Maltseva, T. Nikitenko, G. Zhbakov // 2011 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium, URSIGASS 2011, Istanbul, 13–20 August 2011. – Piscataway, NJ : IEEE, 2011. – P. 6050989. – DOI 10.1109/URSIGASS.2011.6050989.

59. Maltseva, O. A. A new model of the International Reference Ionosphere IRI for Telecommunication and Navigation System / O. A. Maltseva, N. S. Mozhaeva, G. A. Zhbakov // ICTRS 2012. Proceedings of the First International Conference on Telecommunications and Remote Sensing, Sofia, Bulgaria, 29-30 August, 2012. – SciTePress, 2012. – P. 129-138. – DOI 10.5220/0005415001290138. – URL:

<https://ict.rs.org/Documents/ProceedingsOfFirstICTRS.pdf> (data access 23.06.2025)

60. Variations of topside N(h)-profiles of the ionosphere during space weather events / O. A. Maltseva, G. A. Zhibankov, N. S. Mozhaeva, T. V. Nikitenko // Problems of Geocosmos : Proceedings of the 9th International Conference, St. Petersburg, Petrodvorets, October 08-12, 2012 / Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg Branch of the EurAsian Geophysical Society ; Editors: V. N. Troyan, V. S. Semenov, M. V. Kubyshkina. – Saint-Petersburg, 2012. – P. 311-316. – URL: https://geo.phys.spbu.ru/materials_of_a_conference_2012/Geocosmos2012proceedings.pdf (data access 23.06.2025).

61. Maltseva, O. A. Validation of new ionospheric parameter modeling / O. A. Maltseva, G. A. Zhibankov // Recent Advances in Circuits, Systems, Telecommunications and Control : Proceedings of the 4th European Conference of Systems (ECS '13) : Proceedings of the 4th European Conference of Communications (ECCOM '13) : Proceedings of the 4th European Conference of Control (ECC '13) : Proceedings of the 4th European Conference of Circuits Technology and Devices (ECCTD '13) : Proceedings of the 1st WSEAS International Conference on Wireless and Mobile Communication Systems (WMCS '13) : Proceedings of the 1st WSEAS International Conference on Intelligent Control and Applications (ICADE '13), Paris, France, October 29-31, 2013 / Editors: Nikos Mastorakis, Maurice Margenstern, Pierre Borne. – WSEAS Press, 2013. – P. 172-179.

62. Maltseva, O. A. N(h)-profiles of the Ionosphere and Values of the Total Electron Content / O. A. Maltseva, G. A. Zhibankov, G. Ma // PIERS 2014 Guangzhou : Progress In Electromagnetics Research Symposium, August 25–28, 2014 Guangzhou, China : Abstracts. – Cambridge: The Electromagnetics Academy, 2014. – P. 374. – URL: <https://www.piers.org/pierspublications/PIERS2014GuangzhouAbstracts.pdf> (data access 23.06.2025)

63. Determination of the electron density in the plasmasphere using data from the GPS satellites / O. A. Maltseva, G. A. Zhibankov, G. Ma, T. Maruyama // 2014 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium, URSI GASS 2014; Beijing; China; 16-23 August 2014 : сборник докладов –Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014 – P. 6929838. – DOI: 10.1109/URSIGASS.2014.

64. Maltseva, O. A. Variations of topside N(h)-profiles of the ionosphere during space weather events / O. A. Maltseva, G. A. Zhibankov, N. S. Mozhaeva // Problems of Geocosmos: Proceedings of the 10th International Conference, St. Petersburg, Petrodvorets, October 06-10, 2014 / Saint-Petersburg State University Saint-Petersburg Branch of the EurAsian Geophysical Society ; Editors: V. N. Troyan, N. Yu. Bobrov, A. A. Kostrov, A. A. Samsonov, N. A. Smirnova, and T. B. Yanovskaya. – Saint-Petersburg, 2014. – P. 334-338. URL:

https://geo.phys.spbu.ru/materials_of_a_conference_2014/Geocosmos2014proceedings.pdf (data access 23.06.2025).

65. Investigation of optical path functional for high and low ionospheric radio rays / I. A. Nosikov, M. V. Klimenko, P. F. Bessarab, G. A. Zhibankov // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC 2016), Seoul, South Korea 21-25 August 2016. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2016. – P. 1317-1320. – DOI 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601186.

66. Karpachev, A. T. Radio signal reflections in the 7-11 MHz band on the Interkosmos-19 ionograms / A. T. Karpachev, G. A. Zhibankov // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, June 26-30, 2017, Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia. – IEEE, 2017. – P. 121-122. – DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103583.

67. Satellite radiosounding of the polar ionosphere: results of the experiments of the XX century and hopes of the XXI century / V. B. Lapshin, N. P. Danilkin, M. Y. Filippov, V. I. Denisova, G. A. Zhibankov // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, June 26-30, 2017, Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia. – IEEE, 2017. – P. 28-30. – DOI 10.1109/RSEMW.2017.8103553

68. Maltseva, O. Features of a high-latitude ionospheric parameters modeling / O. Maltseva, T. Nikitenko, G. Zhibankov // Journal of Physics: Conference Series : International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences 27–31 October 2018, Moscow, Russian Federation. – 2018. – Vol. 1141. – P. 012056. – DOI 10.1088/1742-6596/1141/1/012056.

69. Peculiarities of the behavior of the ionosphere and HF propagation parameters in September 2017 / D. Blagoveshchensky, O. Maltseva, T. Nikitenko, G. Zhibankov // AIP Conference Proceedings : Recent Advances on Environment, Chemical Engineering And Materials, 22–24 June 2018, Sliema, Malta. – 2018. – Vol. 2022. – P. 020015. – DOI 10.1063/1.5060695.

70. Development of Improved Ionospheric Empirical Model and Software for HF Ray Tracing / M. Klimenko, D. Kotova, G. Zhibankov [et al.] // 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC 2018), Gran Canaria, Spain, 28 May - 1 June 2018. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; Curran Associates, Inc., 2018. – Vol. 2. – P. 614-618. – Art. No 8471348. – DOI 10.23919/URSI-AT-RASC.2018.8471348.

71. Denisenko, P. F. Correction of Models of the Ionosphere According to the Data of Network of the Ground-Based Ionosondes / P. F. Denisenko, G. A. Zhibankov, V. V. Sotsky // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia, July 1-6, 2019, Kazan Federal University : Proceedings. – Kazan: Kazan Federal University, 2019. – C. 51-54. – DOI 10.1109/RWP.2019.8810192.

72. Karpachev, A. T. Delayed Horizontal Terrestrial Traces on the High-Latitudinal Ionograms of the Interkosmos-19 / A. T. Karpachev, G. A. Zhibankov

// 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia, July 1-6, 2019, Kazan Federal University : Proceedings. – Kazan: Kazan Federal University, 2019. – С. 55-58. – DOI: 10.1109/RWP.2019.8810359

73. Karpachev, A. T. Investigation of the Irregular Structure of the Upper Ionosphere from the Interkosmos-19 Data / A. T. Karpachev, G. A. Zhbakov, P. F. Denisenko // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, 24-28 June 2019 : Proceedings of the Conference. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; Curran Associates, Inc., 2019. – P. 28-31. – DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792718.

74. Blagoveshchensky D. On the Role of the Ionospheric Parameters B0 and B1 in the Matching of Calculated and Experimental Values of MUF / D. Blagoveshchensky, O. Maltseva, G. Zhbakov // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, 24-28 June 2019 : Proceedings of the Conference. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; Curran Associates, Inc., 2019. – P. 44-47. – DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792689.

75. Measurements of foF2 in the Arctic Based on Space and Ground-Based Ionosondes / N. P. Danilkin, G. A. Zhbakov, A. Y. Repin [et al.] // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, 24-28 June 2019 : Proceedings of the Conference. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; Curran Associates, Inc., 2019. – P. 56-59. – DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792723

76. Updating DPS-4 ionosonde by ionospheric drift measurements: the LocalDrift software package / G. A. Zhbakov, O. A. Maltseva, V. A. Telegin, V. A. Panchenko // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 28 June 2021 - 02 July 2021 : Proceedings of the Conference. – IEEE, 2021. – P. 337-340. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494072.

77. Investigation of the small-scale irregularities in f-region of the mid-latitude ionosphere by radioprobing and radiolocation / V. A. Telegin, N. Y. Romanova, G. A. Zhbakov [et al.] // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 28 June 2021 - 02 July 2021 : Proceedings of the Conference. – IEEE, 2021. – P. 341-344. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494052.

78. Исследование параметров среднеширотных неоднородностей в F-области ионосферы методами радиопросвечивания и радиолокации / Н. Ю. Романова, В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14–18 ноября 2022 г. : электронный сборник материалов конференции. – Москва: ИКИ РАН, 2022. – С. 385. – DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.

79. Моделирование способов адаптации модели IRI в задаче определения дальности по данным возвратно-наклонного зондирования / П. Ф.

Денисенко, Г. А. Жбанков, В. В. Соцкий // Распространение радиоволн : XXVIII Всероссийская открытая научная конференция (Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года) : сборник докладов / Министерство науки и высшего образования РФ, Российская академия наук, Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн [и др.] ; редакционная коллегия: Д. С. Лукин, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова [и др.]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. – С. 109-111. – Режим доступа: <https://science.volgatech.net/upload/documents/science/RRW2023.pdf> (дата обращения 24.06.2025).

80. Телегин, В. А. Алгоритм автоматического определения уширения ионограмм в F2 области / В. А. Телегин, Г. А. Жбанков, В. А. Панченко // Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2024»). – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. – С. 779-784. – Режим доступа: <https://forum.mirea.ru/2024.pdf> (дата обращения 24.06.2025).

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

81. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618611 Российская Федерация. Prof_Iono («Восстановление ионосферного профиля по ионограмме») : № 2012616501 : заявл. 27.07.2012 : опубл. 21.09.2012 / Г. А. Жбанков.

82. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617557 Российская Федерация. ОКАР («Обработка, корреляция, аппроксимация и распознавание», версия 2a) : № 2013615201 : заявл. 24.06.2013 : опубл. 20.09.2013 / Г. А. Жбанков, Б. И. Журбицкий.

83. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616338 Российская Федерация. Trans_Iono3D ("Моделирование трансionoсферных ионограмм") : № 2016613638 : заявл. 15.04.2016 : опубл. 09.06.2016 / Г. А. Жбанков.

84. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616101 Российская Федерация. Программный комплекс расчета траекторий распространения РВ на наклонной трассе при наличии ионосферных неоднородностей "Неоднородная среда" : № 2020615272 : заявл. 05.06.2020 : опубл. 09.06.2020, Бюл. № 6 / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, Н. Г. Котонаева ; правообладатель федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова".