

На правах рукописи



Першин Александр Владимирович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В СПОКОЙНОЙ И
ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ**

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена в отделе мониторинга верхней атмосферы Земли на основе контролируемых воздействий Научно-исследовательского радиофизического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Научный руководитель: **Выборнов Федор Иванович**
доктор физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: **Крашенинников Игорь Васильевич**
доктор физико-математических наук, снс, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук» (ИЗМИРАН), г. Москва

Белов Алексей Сергеевич
кандидат физико-математических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела, филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седатова», г. Нижний Новгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «ААНИИ»)

Защита состоится 24 сентября 2025 года в 16 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.340.03, созданного на базе Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1552>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 426, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.340.03.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.340.03,
д. ф.-м. н., профессор



А.В. Ключев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы

Несмотря на развитие спутниковых и волоконных линий связи, коротковолновая (КВ) радиосвязь, по-прежнему, играет важную роль в решении прикладных задач ионосферного распространения радиоволн. Ее преимущества заключаются в большой дальности действия, высокой мобильности, живучести и низкой стоимости по сравнению с другими видами связи. К преимуществам КВ радиосвязи следует также отнести оперативность установления связи на большие расстояния, простоту организации радиосвязи с подвижными объектами, возможность обеспечения связи через труднодоступные пространства (зоны повышенного заражения, труднопроходимые водные и горные районы, лесные завалы), довольно простую и быструю восстанавливаемость связи в случае ее нарушения [1]. Особое значение КВ радиосвязь приобретает в чрезвычайных ситуациях — при организации и проведении аварийно-спасательных работ, координации действий различных организаций и служб в районах стихийных бедствий (землетрясений, наводнений, крупных снежных и селевых лавин), во время военных действий.

Для обеспечения надежной работы радиоэлектронных систем различного назначения в различных гелиогеофизических условиях важнейшей задачей является мониторинг ионосферного канала и выбор оптимального радиоканала для радиолинии по результатам зондирования.

В последние два десятилетия для мониторинга ионосферного канала широко используются маломощные станции наклонного ЛЧМ зондирования. Испытания систем КВ радиосвязи как у нас в стране, так и за рубежом с назначением рабочих частот связи по данным наклонного ЛЧМ зондирования в реальном времени показали возможность повышения надежности КВ связи до уровня спутниковых связных систем [2, 3]. Комплекс с ЛЧМ сигналом имеет существенные преимущества перед традиционными радиосредствами с импульсными сигналами. Он отличается высокой помехозащищенностью, высоким разрешением по времени группового запаздывания, имеет малые габариты, вес и энергопотребление [4, 5]. Кроме того, наклонное зондирование имеет существенное преимущество по сравнению с другими методами диагностики ионосферного канала, поскольку непосредственно позволяет определять ключевые характеристики канала, включая максимально наблюдаемую частоту (МНЧ), диапазон оптимальной рабочей частоты (ОРЧ), отношение сигнал/шум, скорость передачи информации, полосу когерентности.

Основная проблема КВ радиосвязи – это нестационарность ионосферного радиоканала, обусловленная воздействием различного рода возмущений естественного и искусственного происхождения (вспышки на Солнце, выбросы корональной массы, прохождение терминатора, землетрясения и вулканическая активность, ураганы, солнечные затмения, промышленные взрывы, старты ракет, нагрев ионосферы и др.) и помехами, создаваемыми посторонними радиостанциями.

К основным типам ионосферных возмущений относятся крупномасштабные (КМ), среднемасштабные (СМ) и мелкомасштабные (ММ) перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) [6].

Несмотря на успехи, достигнутые в реконструкции крупномасштабной структуры ионосферы, определение параметров и прогноз ионосферных возмущений остается серьезной актуальной проблемой. До сих пор нет достаточной ясности в понимании основных свойств ионосферных возмущений, отсутствуют полные достоверные сведения о параметрах неоднородностей ионосферной плазмы, особенно о характеристиках их движения. Остается нерешенным вопрос о глобальном непрерывном контроле за состоянием верхней атмосферы. Очень ограничены возможности его прогноза.

Состояние околоземного космического пространства (ОКП) влияет на работу спутниковых систем, дающих информацию о погоде, обеспечивающих телевидение, связь, навигацию, наблюдение за земной поверхностью, разведку, систему слежения и спасения, гелиогеофизические исследования

Испытывают воздействие космической погоды и радиотрассы, особенно в КВ диапазоне. Ионосферные неоднородности вызывают замирания коротковолновых радиосигналов, появление аномальных сигналов, отклонение направления распространения сигнала от дуги большого круга между передатчиком и приемником. В сильно возмущенных условиях поглощение радиосигнала делает связь на коротких волнах практически невозможной.

Для динамического управления частотным ресурсом и обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем различного назначения (КВ радиосвязь, загоризонтная КВ радиолокация) необходимо иметь надежные данные о диапазоне ионосферных изменений в различных гелиогеофизических условиях.

Для обеспечения устойчивой работы систем КВ радиосвязи большую роль играет прогнозирование динамики изменения ионосферного канала. Результаты зондирования используются для прогнозирования и экстраполяции параметров ионосферного канала на трассы, не оснащенные средствами диагностики путем коррекции модели ионосферы с целью ее адаптации к условиям распространения радиоволн и определения оптимальных участков частот для обеспечения требуемой надежности КВ радиосвязи [7]. Экстраполяции параметров ионосферного канала на трассы, не оснащенные средствами диагностики, особенно актуальна в связи с сокращением числа пунктов наблюдения в стратегически важных районах Крайнего Севера.

В этой связи, актуальными являются исследования особенностей распространения КВ сигналов на стратегически важных субавторальных трассах наклонного зондирования для определения границ ионосферной изменчивости во время солнечной и магнитной активности различной интенсивности, моделирование распространения радиоволн в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере в условиях волновых возмущений различной природы и развитие методов прогнозирования и экстраполяции ключевых параметров ионосферного канала.

Степень разработанности темы исследования

Применяемые в настоящее время для зондирования ионосферного канала маломощные ионозонды с непрерывным излучением линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигналом, позволяют непосредственно определять ключевые параметры ионосферного КВ радиоканала, включая максимальную наблюдаемую частоту (МНЧ), отношение сигнал/шум, диапазон оптимальных рабочих частот, полосу когерентности, скорость передачи информации, надежность связи.

Инерционность ионосферных процессов позволяет устанавливать пространственно-временные корреляционные связи параметров КВ канала и использовать их для прогнозирования на короткие интервалы времени (десятки минут). Согласно измерениям [8] радиус пространственной корреляции вариаций критической частоты ионосферы оказался равен ~ 1000 и 1500 км в направлении север-юг и восток-запад, соответственно.

Для корректировки краткосрочного прогноза ионосферных параметров и повышения точности обычно используют зондовые измерения в реальном масштабе времени, основанные на данных вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы, а также используют сигналы навигационных систем GPS и ГЛОНАСС для мониторинга ионосферы Земли [9-11].

В работах [9, 12] экспериментальные данные по МНЧ, получаемые на сети трасс наклонного зондирования (НЗ) используются для определения эффективного числа солнечных пятен или солнечного потока на длине волны $\lambda = 10.7$ см. Поток находится из условия, чтобы прогнозируемая модель обеспечивала измеряемую МНЧ. Для однокачковых трасс поток связывается с состоянием ионосферы в средней точке трассы НЗ, которая принимается за ионосферную контрольную точку. Для сети трасс НЗ получается некоторое распределение контрольных точек. В случае, если другие контрольные точки расположены достаточно близко к средней точке прогнозируемой трассы, то ее максимальная применимая частота (МПЧ) может быть уточнена путем линейной интерполяции экспериментальных данных [12]. Результаты эксперимента [12] свидетельствуют, что процедуру интерполирования данных НЗ на средних широтах, повышающую точность прогноза, имеет смысл проводить в пределах области, простирающейся на 700 км в широтном и ~ 400 км в долготном (меридиональном) направлениях.

Многие исследователи сделали значительный вклад в изучение ионосферной изменчивости с использованием различных индексов и параметров ионосферы [13-15]. Источником возмущений в ионосфере являются гравитационные, приливные и планетарные волны, которые переносят энергию из нижних слоев в верхнюю атмосферу [16, 17]. Вклад солнечной активности меняется в зависимости от солнечного цикла и связан с потоком частиц солнечного ветра, ультрафиолетовым и рентгеновским излучением.

Для бесперебойной работы радиоэлектронных систем различного назначения необходимо установить диапазоны и пределы ионосферной изменчивости для различных регионов и солнечно-магнитной активности [18]. Оценки изменчивости диапазона частот прохождения КВ сигналов от МНЧ до наиминишей наблюдаемой частоты (ННЧ) $\Delta f = \text{МНЧ} - \text{ННЧ}$ в различных гелиогеофизических условиях особенно важны при планировании КВ радиосвязи и управления радиочастотами в ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службе (ИВЧДС).

Взаимосвязь между ионосферными и магнитными возмущениями сложная, и не существует взаимно-однозначного соотношения между индексом магнитного возмущения и уровнем ионосферных возмущений, измеряемым по депрессии критической частоты, нарушению связи или по другим параметрам. Недостаточно изучено влияние отдельных видов ионосферных возмущений на параметры ионосферного КВ канала.

В этой связи весьма актуальными являются исследования диапазона изменений ключевых параметров ионосферного КВ канала в различных гелиогеофизических условиях и разработка рекомендаций для прогнозирования и предупреждения нарушений работы радиосвязи.

Вопросу моделирования распространения радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы посвящено достаточно много работ, в которых учитывается наличие значительных поперечных градиентов электронной концентрации относительно основной плоскости распространения волны по дуге большого круга (ДБК) [19, 20].

Наличие поперечных градиентов электронной концентрации приводит к отклонению луча от плоскости ДБК и в результате к существенному изменению траектории, которое не может быть в полной мере описано двумерной моделью распространения радиоволн [19]. Причинами наличия в ионосфере горизонтальных градиентов электронной концентрации могут различные естественные и искусственные ионосферные возмущения, такие как ПИВ, ионосферный провал, возмущение в результате суточного хода линии терминатора, область модификации ионосферы мощным радиоизлучением коротковолнового спектра типа Сура. Даже в обычных условиях при фактически невозмущенной ионосфере внешними воздействиями азимутальное отклонение луча в точке приема при длине трассы порядка 1500 км может достигать нескольких градусов (обычно 2-4 град.) относительно ДБК только за счет регулярного суточного хода критической частоты, который обеспечивает нарушение сферической симметрии ионосферы Земли и, соответственно, образование горизонтальных градиентов в ней, что приводит к ошибкам радиопеленгации при отсутствии знаний о величине возникающих отклонений.

Типичными ионосферными возмущениями на средних широтах являются среднемасштабные ПИВ с размерами $\sim 100-500$ км и периодами от десятков минут до нескольких часов [6]. Для исследования ПИВ используются различные методы и техника, в том числе ионозонды вертикального [21] и наклонного зондирования [18], радары некогерентного [22, 23] и когерентного [24]

рассеяния, транссионосферное зондирование с помощью сигналов навигационных спутников GPS [25-26].

Моделирование распространения радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы при наличии ПИВ позволит сопоставить результаты моделирования с экспериментальными данными и определить влияние ПИВ на распространение радиоволн. Для определения направления распространения ПИВ необходимо проведение одновременных наблюдений на трассах различной ориентации. Путем сопоставления экспериментальных данных и моделирования могут быть сделаны оценки направленно-скоростных характеристик ПИВ.

Цели и задачи работы

Цель диссертации заключается в экспериментальном исследовании распространения КВ сигналов на субавроральных и среднеширотных трассах различной протяженности, разработке методов прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимально применимой частоты (МПЧ) путем адаптации модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования ионосферы, определении направленно-скоростных характеристик ПИВ путем сопоставления результатов моделирования КВ сигналов в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере с экспериментальными данными и разработке рекомендаций для нейтрализации неблагоприятных воздействий гелиогеофизических возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Для достижения поставленной цели решены **следующие задачи**:

1. Создан приемо-передающий пункт наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в пгт Васильсурск Нижегородской области для проведения непрерывных круглосуточных многомесячных наблюдений распространения КВ сигналов на среднеширотных и субавроральных трассах различной протяженности.
2. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимально применимой частоты (МПЧ) путем адаптации ионосферной модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования.
3. Определены направленно-скоростные характеристики ПИВ путем сопоставления результатов моделирования КВ сигналов в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере с экспериментальными данными.
4. Определен диапазон изменений МНЧ и ННЧ на стратегически важных субавроральных трассах наклонного зондирования в различных гелиогеофизических условиях.
5. Даны рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий гелиогеофизических возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Научная новизна работы:

1. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции МПЧ на трассы, не оснащенные средствами диагностики, путем адаптации ионосферной модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного ЛЧМ зондирования на субавроральных трассах.

2. Определены направленно-скоростные характеристики ПИВ по данным наклонного ЛЧМ зондирования на слабонаклонной среднеширотной трассе.

3. Определен диапазон изменений МНЧ и ННЧ в различных гелиогеофизических условиях по данным наклонного ЛЧМ-зондирования на субавроральных трассах и даны рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий возмущений на работу систем КВ радиосвязи.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что обоснованные в диссертации рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий магнитно-ионосферных возмущений можно использовать при проектировании и эксплуатации радиоэлектронных систем различного назначения (КВ радиосвязь, загоризонтная КВ радиолокация) для обеспечения их эффективного функционирования в различных гелиогеофизических условиях.

Методология и методы исследований

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались следующие основные методы:

- метод наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ сигналами;
- метод вертикального зондирования ионосферы сигналами ионосферной станции (использовался ионозонд CADI);
- теория распространения электромагнитных волн в плазме.

Также в диссертационной работе при решении поставленных задач использовались методы математической статистики, математическое и численное моделирование.

Компьютерное моделирование распространения коротких радиоволн в ионосферной плазме и обработка полученных экспериментальных данных выполнены в программной среде Matlab.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимально применимой частоты (МПЧ) – путем адаптации ионосферной модели IRI к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования.

2. По анализу данных наклонного ЛЧМ зондирования на близко расположенных слабонаклонных среднеширотных трассах определены направленно-скоростные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

3. Определение диапазона изменений МНЧ и ННЧ в различных условиях по данным наклонного ЛЧМ-зондирования на субавроральных трассах позволяет

разработать рекомендации для нейтрализации неблагоприятных воздействий гелиогеофизических возмущений на работу систем КВ радиосвязи.

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов работы определяется использованием обширного банка ионограмм на трассах различной протяженности, полученных с помощью современной техники наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы, использованием современных методов математического моделирования распространения КВ сигналов и статистических методов обработки экспериментальных данных, согласованием с результатами других авторов.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации автором опубликованы 24 работы: 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК (из них 7 по специальности 1.3.4 - Радиофизика; статей в ведущих изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus); 6 статей и тезиса докладов в сборниках трудов международных научных конференций; 3 статьи доклада в сборниках трудов всероссийских научных конференций; 8 тезисов докладов в сборниках трудов региональных научных конференций.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Ежегодные научные конференции по радиофизике (ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, 2018, 2019, 2022 г.);

- Всероссийской XXVI открытой научной конференции. (Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 2019 г.);

- Всероссийской XXVII открытой научной конференции. (Калининград, 2021 г.);

- Международные научно-технические конференции "Радиолокация, навигация, связь" (г. Воронеж, 2018, 2019, 2020 гг.);

- 42-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений".

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в получении всех результатов изложенных в диссертационной работе. Постановка задач, анализ экспериментальных данных, разработка рекомендаций, обобщение результатов диссертации выполнены совместно с научным руководителем. Автором самостоятельно разработаны методы прогнозирования и экстраполяции МПЧ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 42 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 139 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе в разделе 1.1 проводится обзор аппаратно-программного комплекса для наклонного зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). В разделе 1.2 рассмотрены преимущества зондирования ионосферы с применением сигналов с ЛЧМ в сравнении с традиционными (импульсными) ионозондами. Накоплена база экспериментального материала для исследования ионосферы с использованием ионозонда с ЛЧМ.

В Разделе 1.3 показана возможность использования сети ионозондов с ЛЧМ для регистрации и оценки скорости и направления движения ПИВ. Специальный эксперимент 2019 г. по регистрации ПИВ на трассах слабонаклонного зондирования с расположением станций с ЛЧМ в городах Йошкар-Оле, Казани, Нижнем Новгороде и п. Васильсурск позволил определить скорость и направление распространения возмущения. Трасса Васильсурск-Нижний Новгород имеет длину 129.5 км и азимут 280.26° , Васильсурск-Йошкар-Ола – 123.3 км, 63° , Васильсурск-Казань – 193.3 км, 99.69° (см. рис. 1). Возмущения, проявляющиеся в виде «серпов» на ионограмме, были зарегистрированы 19 декабря многократно на всех трассах (см. рис. 2).

Используя сеть трасс НЗ, получены величина скорости и направление движения ПИВ из системы уравнений (1-2). Где l - расстояние, α - азимут, t - время задержки появления ПИВ на средних точках трасс, v - скорость, φ - азимут вектора скорости ПИВ. Индекс $i = 1$ соответствует средней точке трассы Казань – Йошкар-Ола; $i = 2$ средней точке трассы Васильсурск – Йошкар-Ола; $i = 3$ средней точке трассы Казань – Васильсурск.

$$v \cdot t_{1i} = l_{1i} \cdot \cos(\alpha_{1i} - \varphi), \quad i = 2,3 \quad (1)$$

$$v \cdot t_{2i} = l_{2i} \cdot \cos(\alpha_{2i} - \varphi), \quad i = 2,3 \quad (2)$$

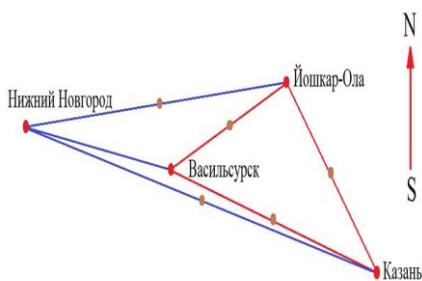


Рис. 1. Схема расположения станций с ЛЧМ в ходе экспериментов по слабонаклонному зондированию ионосферы

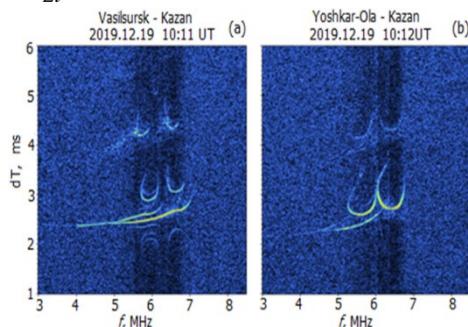


Рис. 2. Ионограммы при наличии ПИВ 19 декабря 2019 в 10:11 и 10:12 UT на трассах: Васильсурск – Казань (а); Йошкар-Ола – Казань (б)

Время задержки появления ПИВ на средних точках трасс определялось по графикам интенсивности проявления ПИВ на ионограмме для каждой из трасс (см. рис. 3).

Исследование с применением пространственно-разнесенных синхронно работающих ионозондов с ЛЧМ позволило получить значения направления и скорости ПИВ ($\varphi \sim 159^\circ$, $v \sim 112$ м/с), что хорошо согласуется с теорией.

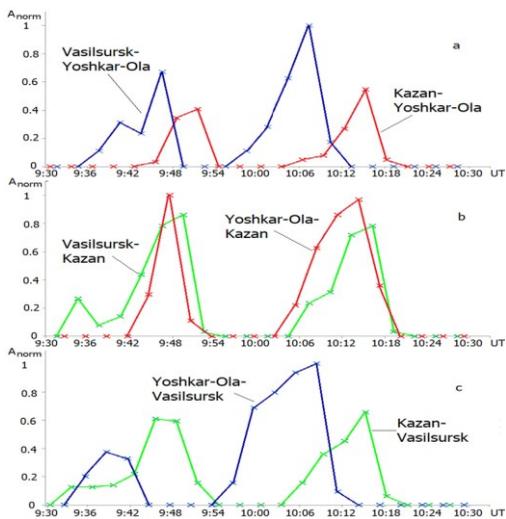


Рис. 3. Нормированные значения интенсивности наблюдаемого сигнала ПИВ 19 сентября 2019 с 9:30 по 10:30 UT на трассах: Васильсурск – Йошкар-Ола (a,c); Казань – Йошкар-Ола (a,b); Казань – Васильсурск (b,c)

экспериментальных данных НЗ с результатами моделирования распространения сигнала в плоскости ДБК при распространении в ионосфере, задаваемой моделью IRI.

Адаптация глобальной модели ионосферы осуществлялась путем коррекции ее основного параметра - числа солнечных пятен W . Для этого рассчитывался суточный ход МПЧ с помощью программы компьютерного моделирования распространения радиоволн [27], в которой ионосфера задавалась моделью IRI [28], а управляющим параметром использовалось значение W прогностического ряда по данным SWPC, Боулдер [29], либо осуществлялся переход от ряда значений W к используемому в модели IRI-2016 ионосферным индексам IG12 и скользящему среднему $Rz12$.

Во второй главе

рассмотрены различные случаи экспериментального исследования и моделирования распространения коротких радиоволн на трассах наклонного зондирования ионосферы в условиях неоднородной ионосферной плазмы в приближении распространения сигнала в плоскости ДБК с пренебрежением влияния поперечных ионосферных градиентов на траекторию сигнала.

В разделе 2.1 выполнена экстраполяция максимальной применимой частоты на трассы, не оснащенные средствами диагностики, путем адаптации ионосферной модели IRI по данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе. Адаптация модели IRI-2007 (либо IRI-2016) выполнялась путем сопоставления реальных

Приемные пункты располагались в Васильсурске и Нижнем Новгороде. Схема эксперимента для пункта Васильсурск показана на рис. 4, а в таблице 1 приведены расстояния между средними точками трасс НЗ. В качестве контрольной трассы использовалась трасса Ловозеро – Нижний Новгород. На рис. 5 (крестики) показан временной ход МНЧ моды 1F2 на этой трассе для 17.12.2016 г. Путем подбора числа солнечных пятен W (параметра модели ионосферы IRI-2007) проводилось глобальное изменение распределения электронной концентрации над поверхностью Земли и, соответственно, вдоль трассы, что приводит к изменению МПЧ. На рис. 5 (красная кривая 2) приведена модельная кривая МПЧ, рассчитанная по адаптивной модели ионосферы IRI-2007. Вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в расчетах изменялось число W .

За счет коррекции W рассчитанное значение МПЧ подгоняется к экспериментальному значению МНЧ с минимальной погрешностью δ :

$$\delta = \frac{\left[\sum_i (P_i - Q_i)^2 \right]^{1/2}}{\left(\sum_i Q_i^2 \right)^{1/2}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где P_i – прогноз (МПЧ), Q_i – эксперимент (МНЧ).

Рассчитывалось также среднее отклонение

$$\Delta(\text{МГч}) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{МПЧ}_i - \text{МНЧ}_i)^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Такой подход позволяет обеспечить прогнозирование и экстраполяцию МПЧ на среднениротной и субавроральных трассах путем адаптации справочной модели ионосферы IRI-2007 и IRI-2016 по результатам наклонного зондирования ионосферы на контрольных и рабочих радиолниях.

Прогноз по адаптированной модели дает среднюю ошибку $\delta_2 = 4.7\%$, что меньше ошибки долгосрочного прогноза, когда $\delta_1 = 19.1\%$.

Таблица 1. Расстояния между средними точками трасс для приемного пункта Васильсурск

Пары трасс: трасса 1/трасса 2	D, км
Ловозеро – Васильсурск/ Горьковская – Васильсурск	452
Ловозеро – Васильсурск/ Соданкюля – Васильсурск	182
Ловозеро – Васильсурск / Диксон – Васильсурск	871
Ловозеро – Васильсурск / Салехард – Васильсурск	675
Диксон – Васильсурск/ Салехард – Васильсурск	472

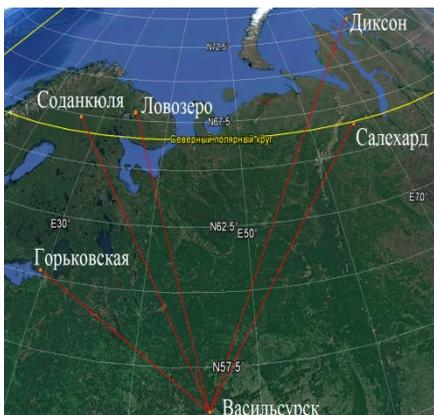


Рис. 4. Схема эксперимента.
Приемный пункт – Васильсурск

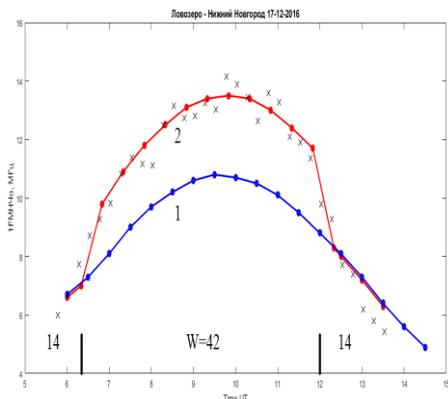


Рис. 5. Временной ход МНЧ моды 1F2 на трассе Ловозеро – Нижний Новгород для 17.12.2016 г.

Для экстраполяции МПЧ использовался также, предложенный в [18], метод контрольных точек, когда для адаптации ионосферной модели на трех контрольных трассах осуществляется линейная интерполяция числа солнечных пятен W_i .

Для всех трех контрольных трасс по модели ионосферы IRI рассчитываются МПЧ и путем подбора числа солнечных пятен W_i добиваются наилучшего согласования с экспериментальным значением МНЧ. В результате моделирования получают значения W_1 , W_2 и W_3 для трасс 1, 2 и 3 соответственно. В эксперименте используются контрольные трассы: Горьковская – Нижний Новгород, Ловозеро – Нижний Новгород и Салехард – Нижний Новгород.

В предположении линейной зависимости значений W_i от географических координат средних точек трасс (точек отражения радиоволн) в их небольшой окрестности имеем уравнение:

$$W = a + bx + cy, \quad (5)$$

где a, b, c - постоянные, $x \equiv \varphi$, $y \equiv \lambda$ - широта и долгота средней точки трассы НЗ, соответственно.

Затем решается система линейных уравнений:

$$\begin{aligned} W_1 &= a + bx_1 + cy_1 \\ W_2 &= a + bx_2 + cy_2 \\ W_3 &= a + bx_3 + cy_3 \end{aligned} \quad (6)$$

где $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ - географические координаты средних точек трех контрольных трасс НЗ.

Путем решения системы (6) определяются постоянные a^* , b^* , c^* для каждого временного интервала T , т.е. находится зависимость числа солнечных пятен W от координат (x, y) .

По трем контрольным точкам W_i подобраны так, что ошибки прогнозирования МПЧ по ним составляют $\sim 0.1 \div 1.9\%$. Ошибки экстраполяции МПЧ на рабочие трассы (Соданкюля – Нижний Новгород и Диксон – Нижний Новгород), средние точки которых расположены в пределах $\sim 180 - 470$ км от ближайших средних точек контрольных трасс составляют $\sim 0.6 \div 3.4\%$, что, на наш взгляд, вполне приемлемо для обеспечения надежной работы связных радиолиний (с адаптацией по частоте), не оснащенных средствами диагностики ионосферного КВ канала в невозмущенной ионосфере.

В разделе 2.2 проанализированы вариации диапазона частот прохождения КВ-сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года.

Измерения проводились с 1 по 31 октября 2016 г. на субавроральной трассе наклонного ЛЧМ-зондирования Салехард (66.5°N , 66.37°E) – Васильсурск (56.1°N , 46.1°E) протяженностью 1572 км (см. рис. 4).

Во время наблюдений имели место несколько периодов магнитной активности (см. рис. 6). Напомним, что индекс Dst показывает изменение геомагнитного поля в результате воздействия магнитного поля кольцевого тока в магнитосфере, образуемого за счет захвата и дрейфа заряженных частиц солнечного ветра.

Согласно эксперименту изменения диапазона частот Δf F -моды обусловлены вариациями МНЧ F , которые хорошо коррелируют с поведением индексов Dst и AE (см. рис. 6б). Во время умеренных и даже слабых магнитных бурь происходит уменьшение МНЧ F (см. рис. 7а).

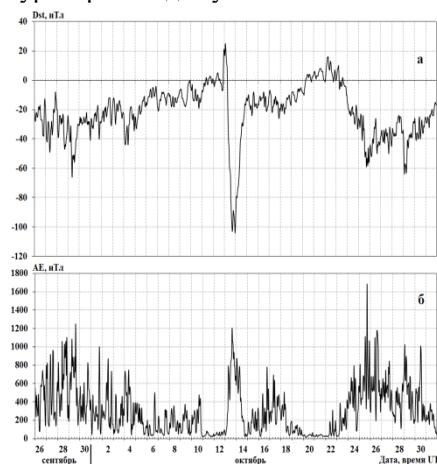


Рис. 6. Геомагнитные индексы Dst (а) и AE (б)

В результате увеличения МНЧ E_s расширяется диапазон частот прохождения КВ сигналов с отражением от слоя E_s , что повышает эксплуатационные возможности использования канала во время магнитно-ионосферных возмущений (см. рис. 7б).

В разделе 2.3 изучено распространение КВ сигналов на сети трасс наклонного зондирования в условиях повышенной солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года. В данном разделе расширено изучение влияния геомагнитной активности в высоких и средних широтах в результате магнитосферно-

ионосферного взаимодействия электрического и магнитного полей в условиях усиления солнечного ветра и выпадения заряженных частиц на распространение КВ сигналов на среднеширотной и субавторальных трассах различного направления и протяженности. Влияние отрицательной фазы магнитной бури и рост поглощения радиоволн проявляются в уменьшении МНЧФ, сокращении диапазона частот Δf и временного интервала прохождения КВ сигналов, что наблюдалось на всех субавторальных трассах, т.е. ионосферный канал КВ радиосвязи был подвержен деградации в обширном Евроазиатском регионе России.

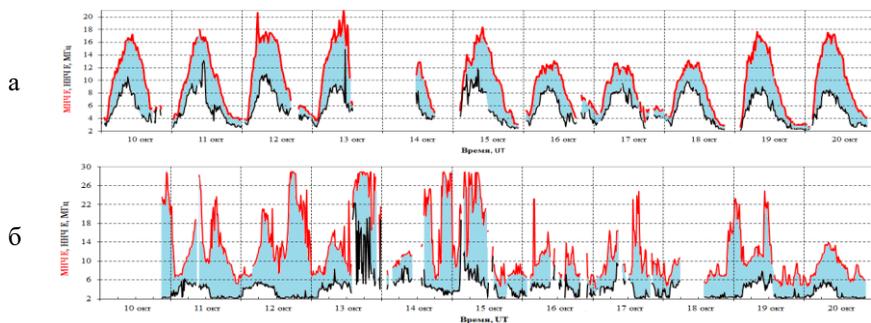


Рис. 7. Временной ход МНЧ и ННЧ на трассе Салехард – Васильурск с 10 по 21 октября 2016 г.: а – моды F; б – моды E

На всех субавторальных трассах во время магнитных бурь наблюдалось развитие спорадического слоя Es и имело место существенное улучшение условий распространения с отражением от слоя Es по сравнению с распространением F-модой через верхнюю ионосферу.

В стратегически важных районах Крайнего Севера представляется целесообразным расширить частотный диапазон ЛЧМ ионозонда до 50-60 МГц. За счет рассеяния радиоволн от ионосферных неоднородностей и отражения от Es. может реализовываться дополнительный канал радиосвязи.

В разделе 2.4 изучено влияние частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. на характеристики ионосферного канала по данным наклонного зондирования. Рассмотрен эффект солнечного затмения, заключающийся в уменьшении МНЧ и ННЧ на трассах наклонного ЛЧМ зондирования. При этом результаты наклонного зондирования использовались для обнаружения акустико-гравитационных волн (АГВ) и их ионосферного отклика в виде ПИВ, генерируемых на высотах озонового слоя в стратосфере при движении лунной тени в атмосфере Земли во время солнечного затмения. Наиболее яркий эффект проявления АГВ в виде квазипериодических вариаций МНЧЕс и МНЧ1F во время солнечного затмения с периодами ~ 30 и 50 минут был замечен на трассе Ловозеро – Васильурск (см. рис. 8).

В третьей главе выполнено моделирование распространения ионосферного радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы при наличии поперечных градиентов электронной концентрации, приводящих к отклонению луча от плоскости ДБК и в результате к существенному изменению траектории, которое не может быть в полной мере описано двумерной моделью распространения радиоволн.

В разделе 3.1 рассмотрены существующие модели ионосферы в задачах распространения радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы, их преимущества для практического применения в задачах моделирования.

В разделе 3.2 изучено влияние ПИВ на характеристики КВ сигналов при слабонаклонном распространении. Представлены результаты исследования ПИВ методом наклонного зондирования на слабонаклонной трассе Васильсурск (56.13°N, 46.1°E, стэнд Сура) – Нижний Новгород (56.0°N, 44.0°E). Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными и сделаны оценки направленно-скоростных характеристик ПИВ.

Моделирование выполнено на основе решения характеристических лучевых уравнений в трёхмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере. Среднемасштабные ионосферные возмущения моделировались на основе гармонической модели ПИВ вида:

$$N_e(\varphi, \lambda, r, t) = N_0(\varphi, \lambda, r, t) \left[1 + \sum_{i=1}^n \delta_i \cos \left(\frac{2\pi}{T} t - \vec{p}_i \vec{r} + \Phi_i \right) \right], \quad (7)$$

где $N_e(\varphi, \lambda, r, t)$ – электронная концентрация в точке со сферическими координатами (φ, λ, r) в момент времени t ; $N_0(\varphi, \lambda, r, t)$ – электронная концентрация в невозмущенной ионосфере, заданная согласно модели IRI-2016, n – количество ПИВ, δ_i – относительная амплитуда ПИВ,

$\vec{p}_i = \frac{2\pi}{\Lambda_i} \{ \cos \beta_i \sin \alpha_i, \cos \beta_i \cos \alpha_i, \sin \beta_i \}$ – волновой вектор ПИВ, α_i – азимут,

β_i – угол места распространения ПИВ в точке расположения передатчика (азимут отсчитывается от направления на север; угол места всегда отсчитывается от плоскости горизонта и имеет знак «-», если вектор направлен вниз от

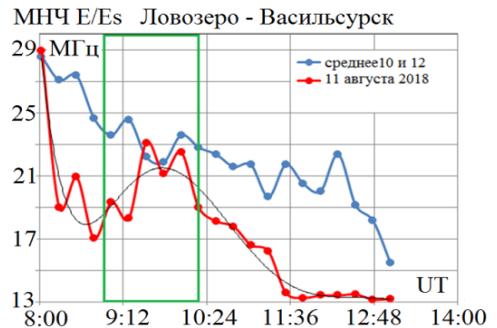


Рис. 8. Зависимость МНЧ E/E_s для трассы Ловозеро – Васильсурск во время частного солнечного затмения 11 августа 2018 г.

плоскости горизонта), T – период и Φ_i – начальная фаза гармонического возмущения.

При моделировании ПИВ варьировались параметры одного гармонического возмущения. На ионограммах (см. рис. 9) видны серпообразные треки ПИВ на обеих магнитоионных компонентах. В процессе движения ПИВ область групповых задержек, где наблюдается расщепление, постепенно расширяется в сторону все меньших групповых задержек.

Подобное расщепление треков является типичным проявлением ПИВ на ионограммах вертикального зондирования в результате образования многолучевого распространения сигнала.

Многолучевое распространение может приводить к отклонению

пеленга на передатчик до 6.4° , наиболее значительное для обыкновенной компоненты.

Было установлено, что во время эксперимента в ионосфере имело место перемещающееся ионосферное возмущение с оценочными параметрами $\delta \sim 0.1$, $\alpha = 83^\circ$, $\beta = -45^\circ$, $\Lambda = 100$ км и скоростью $V = \Lambda / T \sim 110$ м/с, что хорошо согласуется с характеристиками среднемасштабных ПИВ [30].

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. Ф.И. Выборнову за научное руководство, консультации, плодотворные дискуссии, за ценные советы и замечания по теме диссертации. Автор благодарен сотрудникам НИРФИ ННГУ им. Лобачевского за помощь в организации и проведении экспериментов.

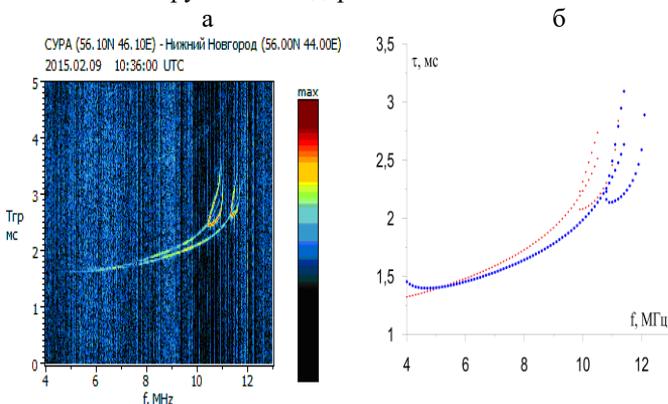


Рис. 9. Экспериментальные (а) и расчетные (б) ионограммы, красные и синие кривые - "о" и "х" компоненты соответственно

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Получен ряд достижений, имеющих важное значение для прогнозирования ключевых характеристик ионосферного КВ канала и моделирования распространения радиоволн в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере в условиях ПИВ. Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Проведена модернизация ЛЧМ ионозонда. Создана сеть персональных компьютеров ЛЧМ станций с удаленным контролем состояния ЛЧМ станций позволил наладить круглосуточную синхронную работу всех ионосферных станций ННГУ им. Н.И. Лобачевского и обеспечить проведение непрерывного круглосуточного многомесячного мониторинга ионосферы на трассах в различных гелиогеофизических условиях. Создана база данных ионограмм наклонного ЛЧМ зондирования и ключевых параметров ионосферного канала (ННЧ, МНЧ, оптимальная рабочая частота (ОРЧ)) на субавроральных и среднеширотных трассах: Соданкюля – Васильсурск, Салехард – Васильсурск, Ловозеро – Васильсурск, Горьковская – Васильсурск, Диксон – Васильсурск, Кипр – Нижний Новгород, Васильсурск – Нижний Новгород и др. с доступом по сети Интернет.

2. Разработаны и экспериментально проверены методы прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного КВ канала – максимальной применимой частоты (МПЧ) путем адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы на сети субавроральных и среднеширотной трасс в обширном Евроазиатском регионе в интервале широт $\sim 56\div 73.5^\circ\text{N}$ и долгот $\sim 26.6\div 80.7^\circ\text{E}$ в условиях низкой солнечной активности. Показано, что использование адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным НЗ обеспечивает заметный выигрыш в повышении точности прогноза МПЧ по сравнению с долгосрочным прогнозом. Преимущество метода наклонного зондирования для прогнозирования и экстраполяции по сравнению с другими методами коррекции фоновой ионосферы (вертикальное зондирование, возвратно-наклонное зондирование и GPS/ГЛОНАСС) заключается в возможности непосредственного определения ключевых характеристик ионосферного КВ канала для адаптации радиоэлектронных систем различного назначения к условиям распространения радиоволн.

Показано, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния $\sim 180\div 870$ км составляют $\sim 4.7\div 8.6\%$ (17.12.2016 г.) и $\sim 4.9\div 9.6\%$ (03.09.2017 г.), что заметно меньше, чем ошибки по данным долгосрочного прогнозирования $\sim 18\div 21\%$ (17.12.2016 г.) и $\sim 7.5\div 12.9\%$ (03.09.2017 г.).

Показано, что ошибки экстраполяции МПЧ по трем контрольным точкам для различных временных интервалов (утро, день, вечер) в условиях спокойной геомагнитной обстановки составляют $\sim 0.6\div 3.4\%$ (17.12.2016 г.) и $\sim 2\div 5.4\%$ (03.09.2017 г.), что существенно меньше, чем ошибки по долгосрочному прогнозу.

3. Определен диапазон изменений МНЧ и ННЧ на стратегически важных субавроральных трассах наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в различных гелиогеофизических условиях. Установлено, что магнитные бури и магнитосферные суббури, имевшие место 7-8 и 14-17 сентября 2017 г., оказали существенное влияние на распространение КВ сигналов на среднеширотной и субавроральных трассах привели к сокращению диапазона частот прохождения сигналов и временного интервала прохождения КВ сигналов, вплоть до блэкаута в обширном Евроазиатском регионе России, где проходят линии КВ радиосвязи.

Результаты исследования распространения КВ сигналов на среднеширотной и субавроральных трассах в Евроазиатском регионе позволяют сделать вывод, что для обеспечения надежной КВ радиосвязи в условиях геомагнитных возмущений необходимо осуществлять оперативный контроль условий распространения радиоволн с помощью современных средств наклонного зондирования с ЛЧМ для получения данных о диапазоне ионосферных изменений в различных гелиогеофизических условиях.

4. Разработаны предложения для повышения надежности радиосвязи в высокоширотной ионосфере. Учитывая особенности формирования в высокоширотной ионосфере каналов распространения КВ сигналов в условиях магнитно-ионосферных возмущений, для обеспечения надежной работы радиотехнических систем в стратегически важных районах Крайнего Севера представляется целесообразным расширить частотный диапазон ЛЧМ ионозонда до 30-60 МГц, где имеет место авроральное поглощение, связанное с высыпанием частиц и наблюдается эффект блэкаута коротких волн во время сильных возмущений. Высыпание частиц во время магнитной бури сопровождается образованием развитой неоднородной структуры и интенсивного спорадического слоя *Es*. При этом за счет рассеяния радиоволн от ионосферных неоднородностей и отражения КВ сигналов от *Es* на частотах $\sim 30\text{--}60$ МГц может реализовываться дополнительный канал радиосвязи для обеспечения эффективного функционирования радиотехнических систем путем адаптации к условиям распространения радиоволн по результатам наклонного зондирования ионосферы.

5. Определены направленно-скоростные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) путем сопоставления результатов моделирования КВ сигналов в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере с экспериментальными данными наклонного ЛЧМ-зондирования. Показано, что на короткой среднеширотной трассе Васильсурск – Нижний Новгород протяженностью 130 км наилучшее согласование экспериментальных и модельных ДЧХ имело место для ПИВ с оценочными параметрами: амплитуда

возмущения $\delta \sim 0.1$, длина волны $\Lambda = 100$ км, скорость $V \sim 110$ м/с с ориентацией волнового вектора к горизонтالي под углом $\beta = -45^\circ$ и азимутом $\alpha = 83^\circ$, что хорошо согласуется с известными данными о параметрах среднесапштабных волновых возмущений.

В результате же работы сети синхронно работающих ионозондов с ЛЧМ в эксперименте 2019 года (станции Васильсурск – Казань – Йошкар-Ола) во время повышенной геомагнитной активности были получены результаты, свидетельствующие о направлении движения ПИВ с $\alpha \sim 159^\circ$ и $V \sim 112$ м/с. Результаты моделирования и результаты определения направления и скорости ПИВ с помощью сети ионозондов хорошо согласуются с известными данными о параметрах среднесапштабных волновых возмущений в ионосфере.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Научные статьи, опубликованные в журналах перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

1. Урядов, В.П. Экстраполяция максимально применимой частоты путем адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного зондирования в Евроазиатском регионе / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Известия Вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 12.
2. Урядов, В.П. Особенности распространения коротковолновых сигналов на трассах наклонного зондирования во время солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Известия Вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 95-109.
3. Урядов, В.П. Вариации диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Известия вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 2. – С. 83-94.
4. Шейнер, О.А. Оценка степени ионосферных возмущений по поведению нового ионосферного индекса / О.А. Шейнер, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62, № 4. – С. 509-517.
5. Vybornov, F. On the results of a special experiment on the registration of traveling ionospheric disturbances by a system of synchronously operating chirp ionosondes / F. Vybornov, O. Sheiner, A. Pershin, A. Kolchev, E. Zykov, A. Chernov, V. Shumaev // Atmosphere. – 2022. – V. 13, № 1.
6. Вертоградов, Г.Г. Моделирование распространения декаметровых радиоволн в условиях волновых возмущений концентрации электронов / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Известия вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 6. – С. 462-473.

7. Вертоградов, Г.Г. Однопозиционное определение местоположения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // Известия вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, № 12. – С. 1072-1092.

Доклады в материалах научных конференций

1. Урядов, В.П. Результаты наблюдений частного солнечного затмения 11 августа 2018 года на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в евроазиатском регионе / В.П. Урядов, В.И. Куркин, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, О.А. Шейнер // Physics of Auroral Phenomena. – 2020. – Т. 43, № 1. – С. 138-141.
2. Вертоградов, Г.Г. Определение местоположения источников радиоизлучения в КВ диапазоне. 2. Использование ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. В 5-и томах. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. – Т. 3. – С. 223-229.
3. Вертоградов, Г.Г. Определение местоположения источников радиоизлучения в КВ диапазоне. 1. Использование пеленгатора-дальномера / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции (17-19 апреля 2018 г.). В 5-и томах. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. – Т. 3. – С. 213-222.
4. Uryadov, V.P. Results of observations of the ionosphere response to a partial solar eclipse on 11.08.2008 according to data from a network oblique sounding paths in the Eurasian region / V.P. Uryadov, F.I. Vybornov, A.V. Pershin, O.A. Sheiner, V.I. Kurkin // В сборнике: 2020 33rd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. – URSI GASS 2020. 33. 2020. С. 9232238.
5. Урядов, В.П. Прогнозирование и экстраполяция МПЧ по данным наклонного зондирования ионосферы в евроазиатском регионе / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова: в 6-ти томах. Воронежский государственный университет, АО "Концерн "Созвездие". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. – С. 403-413.
6. Урядов, В.П. Наклонное зондирование ионосферы в условиях магнитной активности в сентябре 2017 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В.

- Першин // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6-ти томах. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. – С. 361-368.
7. Урядов, В.П. Диапазон изменений ключевых параметров ионосферного КВ канала по данным наклонного зондирования на субавроральной трассе в условиях магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.М. Станченков // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – С. 387-397.
 8. Вертоградов, Г.Г. Траекторный синтез ионограмм на слабонаклонной трассе в условиях волновых возмущений / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // В сборнике: Распространение радиоволн Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах (Казань, 1-6 июля 2019 г.). – Казань: КФУ, 2019. – С. 372-375.
 9. Вертоградов, Г.Г. Оценка точности определения местоположения источника радиоизлучения с помощью ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Чайка, В.А. Валов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.С. Стародубровский // В сборнике: Распространение радиоволн Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции (Казань, 1-6 июля 2019 г.). В 2-х томах. – Казань: КФУ, 2019. – С. 376-379.
 10. Выборнов, Ф.И. Применение пространственно-разнесенных ЛЧМ-станций для регистрации перемещающихся ионосферных возмущений / Ф.И. Выборнов, Н.В. Бахметьева, Е.Ю. Зыков, А.А. Колчев, А.В. Першин, А.Г. Чернов, В.В. Шумаев // В сборнике: Распространение радиоволн. Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции. Калининград. – 2021. – С. 352-357.
 11. Вертоградов, Г.Г. Моделирование квазивертикального зондирования ионосферы в условиях волновых возмущений / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // В сборнике: Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолaborатории. Материалы докладов. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2018. – С. 187-190.
 12. Урядов, В.П. Волновые возмущения во время авроральной суббури по данным наклонного зондирования ионосферы / В.П. Урядов, А.А. Колчев, Ф.И. Выборнов, И.А. Егосин, В.В. Шумаев, А.В. Першин, А.Г. Чернов // В сборнике: Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолaborатории. Материалы докладов. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2018. – С. 183-186.

13. Урядов, В.П. Адаптация модели IRI-2016 к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования / В.П. Урядов, А.М. Станченков, А.В. Першин, Ф.И. Выборнов, В.А. Яшнов, Д.А. Масляев // В книге: Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2019. – С. 179-182.
14. Урядов, В.П. Вариации ключевых параметров ионосферного КВ канала на субавроральной трассе в условиях магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.А. Пичененко, А.В. Першин // В книге: Труды XXIV научной конференции по радиофизике, посвященной посвящённой 75-летию радиофизического факультета. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2020. – С. 156-159.
15. Урядов, В.П. Влияние солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 г. на характеристики сигналов наклонного зондирования ионосферы / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.М. Станченков, Д.А. Масляев // В книге: Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2019. – С. 183-186.
16. Урядов, В.П. Результаты наблюдений частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. по данным наклонного зондирования / В.П. Урядов, Д.А. Масляев, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин, А.М. Станченков // В книге: Труды XXIII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 2019. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2019. – С. 187-190.
17. Бахметьева, Н.В. Результаты работы среднеширотной сети ЛЧМ станций зондирования ионосферы в 2020-2022 годах / Н.В. Бахметьева, Ф.И. Выборнов, Е.Ю. Зыков, А.Ю. Клинов, А.А. Колчев, А.В. Першин, О.А. Шейнер, В.В. Шумаев, А.Г. Чернов // В сборнике: Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой. Материалы конференции. Нижний Новгород, 2022. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. – С. 138-141.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комарович, В.Ф. КВ радиосвязь. Состояние и направления развития / В.Ф. Комарович, В.Г. Романенко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – № 12. – С. 3-16.
2. Goodman, J.M. HF Communication, Sciences and Technology / J.M. Goodman. – New York, USA, 1992.
3. Иванов, В.А. Аппаратура частотного обеспечения в адаптивной системе КВ радиосвязи / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, В.П. Урядов, В.В. Шумаев // Электросвязь. – 1995. – № 11. – С. 30-32.
4. Иванов, В.А. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях (обзор) / В.А. Иванов, В.И. Куркин, В.Е. Носов, В.П. Урядов, В.В. Шумаев // Изв. Вузов Радиофизика. – 2003. – Т. 46, № 11. – С. 919-952.
5. Филипп, Н.Д. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / Н.Д. Филипп, Н.Ш. Блаунштейн, Л.М. Ерухимов и др. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 288 с.
6. Афраймович, Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Первалова. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
7. Урядов, В.П. Экстраполяция максимально применимой частоты путем адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного зондирования в Евроазиатском регионе / В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 12.
8. McNamara, L.F. Spatial correlations of foF2 deviations and their implications for global ionospheric models: 1. Ionosondes in Australia and Papua New Guinea / L.F. McNamara, P.J. Wilkinson // Radio Sci. – 2009. – V. 44, RS2016, – doi: 1029/2008RS003955.
9. Ivanov, V.A. Forecasting and updating HF channel parameters on the basis of oblique chirp sounding / V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, V.V. Shumaev, V.P. Uryadov // Radio Sci. – 1997. – V. 32, № 3. – P. 983-988.
10. Арефьев, В.И. Методы диагностики характеристик ионосферы для заданного региона и коррекция моделей ионосферы в интересах повышения точности прогнозирования распространения декаметрового диапазона / В.И. Арефьев, М.К. Кочерова, А.Б. Талалаев, В.В. Тихонов // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. – 2016. – №1. – С. 33-51.
11. Крашенинников И.В. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 / И.В. Крашенинников, И.Б. Егоров, Н.М. Павлова // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 4. – С. 526.
12. Reilly, M.H. Sounder updates for statistical model predictions of maximum usable frequencies on HF sky wave paths / M.H. Reilly, M. Daehler // Radio Sci. – 1986. – Vol.21. – №.6. – P. 1001-1008.

13. Fotiadis, D.N. On the global behavior of the day-to-day MUF variation / D.N. Fotiadis, G.M. Baziakos, S.S. Kouris // *Adv. Space Res.* – 2004. – V. 33. – P. 893–901.
14. Araujo-Pradere, E. A. Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity / E. A. Araujo-Pradere, T. J. Fuller-Rowell, M.V. Codrescu, D. Bilitza // *Radio Sci.* – 2005. – V. 40. – doi:10.1029/2004RS003179.
15. Deminov, M. G. Statistical properties of variability of the quiet ionosphere F2-layer maximum parameters over Irkutsk under low solar activity / M. G. Deminov, G.F. Deminova, G.A. Zherebtsov, N. Polekh // *Adv. Space Res.* – 2013. – Vol. 51. – P. 702–711.
16. Forbes, J.M. Variability of the ionosphere / J.M. Forbes, S.E. Palo, X. Zhang // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2000. – V. 62. – P. 685–693.
17. Rishbeth, H. Patterns of F2 layer variability / H. Rishbeth, M. Mendillo // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2001. – V. 63. – P. 1661–1680.
18. Вертоградов, Г.Г. Мониторинг волновых возмущений методом наклонного зондирования ионосферы / Г.Г. Вертоградов, В.Г. Вертоградов, В.П. Урядов // *Изв. Вузов. Радиофизика.* – 2006. – Т. 49, № 12. – С. 1015-1029.
19. Ларюнин, О.А. Численный синтез ионограмм в горизонтально-неоднородной ионосфере на основе модели комбинированного параболического слоя / О.А. Ларюнин. // *Солнечно-земная физика.* – 2016. – Т. 2, № 3.
20. Вертоградова, Е.Г. Диагностика, моделирование и прогнозирование характеристик декаметровых радиоволн в естественно возмущенной и искусственно модифицированной ионосфере. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Вертоградова Елена Геннадьевна; ФГАОУ высшего профессионального образования «Южный федеральный университет». – Ростов-на-Дону, 2014.
21. Bowman, G.G. A review of some recent work on mid-latitude spread F occurrence as detected by ionosondes / G.G. Bowman // *J. Geomagn. Geoelectr.* – 1990. – V. 42. – P. 109.
22. Черногор, Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы / Л.Ф. Черногор // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59-106.
23. Бурмака, В.П. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов / В.П. Бурмака, В.И. Таран, Л.Ф. Черногор // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2004. – Т. 44, № 4. – С. 518-534.
24. MacDougall, J.W. Travelling ionospheric disturbance properties deduced from Super Dual Auroral Radar measurements / J.W. MacDougall, D.A. Andre, G.J. Sofko, C.S. Huang, A.V. Koustov // *Ann. Geophysicae.* – 2001. – V. 18. – P. 1550-1559.

25. Афраймович, Э.Л. Спектр перемещающихся ионосферных возмущений по данным глобальной сети GPS / Э.Л. Афраймович, Е.А. Косоголов, О.С. Лесюга, И.И. Ушаков // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44, № 10. – С. 828-839.
26. Borries, C. Storm induced large scale TIDs observed in GPS derived TEC / C. Borries, N. Jakowski, V. Wilken // Ann. Geophys. – 2009. – V. 27, №. 4. – P. 1605-1612.
27. Понятов, А.А. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн: Препринт НИРФИ № 428 / А. А. Понятов, В.П. Урядов. – Нижний Новгород, 1996. – 20 с.
28. Bilitza, D. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, C. Mertens, V. Truhlik, et al.// J. Space Weather Space Clim. – 4(A07). – doi:10.1051/swsc/2014004.
29. Space Weather Prediction Center: сайт. National oceanic and atmospheric administration (NOAA). URL: www.swpc.noaa.gov (дата обращения: 28.02.2020).
30. Hunsucker, R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A Review / R.D. Hunsucker // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – V. 20, №. 2. – P. 293-315.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Применение аппаратно-программного комплекса с ЛЧМ в исследованиях ионосферы.	20
1.1 Приёмно-передающая станция зондирования ионосферы сигналами с ЛЧМ.....	20
1.2 Принцип зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом....	22
1.3 Регистрация ПИВ с помощью ионозонда с ЛЧМ.....	28
1.4. Заключение по первой главе.....	33
Глава 2. Экспериментальное исследование и моделирование распространения коротких радиоволн на трассах наклонного зондирования ионосферы	35
2.1. Прогнозирование максимальной применимой частоты. Коррекция модели ионосферы путем адаптации ионосферной модели IRI по данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе.	35
2.2 Вариации диапазона частот прохождения КВ сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года.....	59
2.3. Распространение КВ сигналов на сети трасс наклонного зондирования в условиях повышенной солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года.....	74
2.4. Влияние частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. на характеристики ионосферного канала по данным наклонного зондирования.....	96
2.5. Заключение по второй главе.	101
Глава 3. Моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн в трехмерно-неоднородной ионосферной плазме	103
3.1. Модели ионосферы в задачах распространения радиоволн в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы.....	103
3.2. Влияние ПИВ на характеристики КВ сигналов при слабонаклонном распространении на трассе Васильсурск – Нижний Новгород.....	108
3.3. Заключение по третьей главе.....	116
Заключение	118
Список сокращений и условных обозначений	122
Список литературы	123

Першин Александр Владимирович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В СПОКОЙНОЙ
И ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____ г. Заказ № _____

Формат _____. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100.

Типография _____