

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ ААНИИ

д.г.н. проф. РАН

А.С. Макаров

«27» сентября 2025 г.



ОТЗЫВ

Ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения
«Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

(ФГБУ «ААНИИ»)

на диссертационную работу

Першина Александра Владимировича

**«Экспериментальное исследование и моделирование распространения
коротких радиоволн в спокойной и возмущенной ионосфере»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук

по специальности 1.3.4. Радиофизика

Актуальность

Диссертационная работа Першина Александра Владимировича посвящена экспериментальному исследованию распространения радиоволн КВ диапазона в средних и субавроральных широтах методом наклонного радиозондирования ионосферы. Несмотря на развитие радиотехнических средств наземного и космического базирования УКВ диапазона, исследование условий распространения коротких волн имеет важное теоретическое и прикладное значение. Радиоволны КВ диапазона по-прежнему используются в системах связи, радиолокации и навигации. В последнее время, внедрение новых протоколов связи и цифровой обработке сигналов радиотехнические системы декаметрового диапазона получили новый импульс развития.

Основной проблемой КВ радиосвязи является нестационарность ионосферного канала, который подвержен воздействию факторов космической погоды естественного и искусственного происхождения. Воздействие космической погоды проявляется в виде замираний, внезапной девиации частоты и аномального

ослабления сигнала, отклонение траектории распространения от дуги большого круга.

Основным методом исследования ионосферного распространения радиоволн в диссертационной работе является метод наклонного зондирования (НЗ), который имеет существенные преимущества, поскольку позволяет непосредственно определить основные характеристики радиоканала и параметры ионосферы вдоль траектории.

Работу Першина А.В. отличает комплексный подход к проблеме. Анализ отечественной и зарубежной практики использования комплексов наклонного зондирования, а также опыт, полученный при эксплуатации ионозондов с линейно-частотной модуляцией, позволили автору определить те основные направления радиофизических исследований, в которых могут быть достигнуты наиболее перспективные результаты.

Целью работы является экспериментальное исследование распространения КВ сигналов на субавроральных и среднеширотных трассах различной протяженности, разработка 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, определение направленно-скоростных характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) путем сопоставления результатов моделирования КВ сигналов в трехмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере с экспериментальными данными и разработка рекомендаций для нейтрализации неблагоприятных воздействий гелиогеофизических возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Научная новизна

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 зондирования на субавроральных трассах.
2. Определены направленно-скоростные характеристики ПИВ по данным наклонного зондирования на слабонаклонной среднеширотной трассе.
3. Определен диапазон изменений МНЧ и наименьшей наблюдаемой частотой (ННЧ) в различных гелиогеофизических условиях по данным наклонного

зондирования на субавторальных трассах и даны рекомендации для минимизации неблагоприятных воздействий факторов космической погоды на работу систем КВ радиосвязи.

Научная и практическая значимость

Результаты, полученные А.В. Першиным при выполнении диссертационной работы могут быть рекомендованы для практического применения при проектировании, организации и эксплуатации различных радиотехнических систем декаметрового диапазона, будут способствовать их более эффективному функционированию в различных гелиогеофизических условиях. Научная значимость работы состоит в результатах наблюдения ПИВ, анализе их скоростных и пространственно-временных характеристик, которые могут быть востребованы при решении научных задач, связанных с вопросами физики солнечно-земных связей и магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертации, подтверждается использованием современных подходов к постановке и проведению радиофизических наблюдений; использованием адекватных методов анализа и обработки результатов измерений; представительной статистикой экспериментальных данных; проверкой экспериментальных данных с помощью численного моделирования. Основные положения и выводы диссертационной работы в полной мере изложены в 24 научных работах, опубликованных Першиным Александром Владимировичем, в том числе, 7 публикаций в изданиях «Перечня ведущих периодических изданий ВАК» и цитируемых на научных платформах Web of Science и Scopus. Результаты диссертации докладывались на 9 российских и международных конференциях.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав и заключения, содержит 140 страниц, включает 42 иллюстрации и 7 таблиц, а также список литературы из 139 работ отечественных и зарубежных авторов.

Во Введении представлены цели и задачи диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту, степень разработанности темы исследования, актуальность и новизна работы, а также ее теоретическая и практическая значимость.

В **Главе 1** приводится обзор аппаратно-программного комплекса зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией. Рассмотрены преимущества ионозондов с ЛЧМ сигналами по сравнению с импульсными. Показана возможность использования сети ионозондов с ЛЧМ сигналами для регистрации и оценки вектора скорости ПИВ.

В **Главе 2** приведены результаты экспериментов и моделирования распространения радиоволн КВ диапазона на трассах наклонного зондирования в условиях неоднородной ионосферы. Выполнена экстраполяция максимальной применимой частоты на трассы, не оснащенные средствами диагностики, путем адаптации ионосферной модели IRI по данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе.

Выполнен анализ экспериментальных данных по вариациям ширины полосы прохождения КВ-сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферных возмущений в октябре 2016 года. Подтверждено заключение о рациональности использования отражения сигналов от Es- слоя с целью повышения эксплуатационных возможностей систем радиосвязи КВ диапазона во время магнитно-ионосферных возмущений.

На основе экспериментальных данных изучено распространение КВ сигналов в условиях повышенной солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года. Рассмотрены характеристики принимаемых сигналов, такие как интенсивность и МНЧ, а также ширина полосы частот ионосферного канала в зависимости от фазы магнитной бури. Отмечается, что для исследования условий прохождения радиоволн на субавроральных трассах частотного диапазона существующих ионозондов недостаточно и представляется целесообразным расширить диапазон рабочих частот ионозонда с ЛЧМ сигналами до 50-60 МГц.

По экспериментальным данным, полученным на трассах наклонного радиозондирования, рассмотрено влияние частного солнечного затмения 11 августа 2018 г. на характеристики ионосферного канала. Показано проявление эффекта акустико-гравитационных волн в виде квазипериодических вариаций МНЧ слоя Es и F2 во время солнечного затмения с периодами, примерно, 30 и 50 минут.

В **Главе 3** выполнено моделирование ионосферного распространения радиоволн КВ диапазона в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы при наличии поперечных градиентов электронной концентрации. Наличие градиентов электронной концентрации приводило к отклонению луча от траектории вдоль дуги большого круга и как следствие, существенному изменению траектории.

Рассмотрены наиболее часто используемые модели ионосферы в рамках

решения задач распространения радиоволн, их преимущества и недостатки. Показано, что модель IRI более пригодна к задачам моделирования распространения радиоволн, поскольку отличается удовлетворительной способностью к адаптации в конкретным гелиогеофизическим условиям и при этом способна оставаться автономной.

Исследовано влияние ПИВ на характеристики КВ сигналов при слабонаклонном распространении. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, сделаны оценки направления движения и скорости ПИВ.

Замечания

1. Результаты исследования характеристик ПИВ получены по данным слабонаклонного и вертикального зондирования ионосферы. Широкомасштабные исследования параметров ПИВ данными методами, а также наклонного зондирования ионосферы на протяженных радиотрассах, выполняются в Институте солнечно-земной физики СО РАН. На заседании Научного совета Солнце -Земля от 11 декабря 2024, где обсуждались результаты года, было постановлено, что важнейшим результатом по направлению «Инфраструктурные и перспективные проекты» является многопозиционная сеть ЛЧМ ионозондов для непрерывного мониторинга характеристик ионосферных возмущений в азиатском регионе России ИСЗФ СО РАН. Помимо этого, большой объем работ по исследованиям методом НЗ выполняется такими организациями как ФГБУ «ААНИИ», ИКФИА СО РАН и ИЗМИРАН. В работе недостаточно учтен опыт и отсутствует сопоставление результатов, полученных автором с результатами, перечисленных выше организаций.

2. В Главе 2 автор приводит результаты краткосрочного прогнозирования МПЧ с помощью регрессионного уравнения на различных радиотрассах. Согласно представленным данным коэффициент корреляции расчетного и измеренного значения МНЧ моды 1F2 на интервале 0,5 – 1 час составил 0,7 – 0,9. Для разных трасс длина выборки составляла, в среднем, от 31 до 76 значений. Автор не приводит методику выбора оптимальной длины выборки, что затрудняет оценку предложенного алгоритма прогнозирования МПЧ.

3. В диссертационной работе одним из методов исследования указывается метод вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы. Однако, результаты наблюдений методом ВЗ показаны только в Главе 1 на рис. 1.7, где приведен график зависимости критической частоты f_oF2 и истинной высоты точки отражения на

частоте 4 МГц. Приведенный график не комментируется в работе и не используется при анализе результатов наблюдения ПИВ, хотя данные ВЗ представляют несомненный интерес при исследовании характеристик ПИВ, особенно сравнение результатов наблюдения методами вертикального и наклонного зондирования. Также в работе не раскрывается метод расчета истинной высоты точки отражения для частоты, равной, 4 МГц.

4. На странице 24 в формуле 1.9 используется обозначение $f_{\text{э}}$ – смысл которого не раскрыт.

5. В подписи к рис. 1.7. используется обозначение критической частоты f_0F2 , должно использоваться $foF2$.

6. На приведенных ионограммах НЗ (рис. 1.4.) наблюдаются нетипичные следы в виде перевернутых «серпов», описание которых не приводится в работе.

Заключительная часть

Отмеченные недостатки не снижают значимости диссертационной работы, в которой проведен разносторонний анализ экспериментальных данных исследования распространения КВ сигналов на среднеширотных и субавроральных трассах при различных гелиогеофизических условиях. Для достижения поставленной цели организован приемо-передающий пункт и диагностические трассы НЗ ионосферы; использованы, лично полученные автором, экспериментальные результаты и выполнено математическое моделирование радиосигналов на различных трассах; проведен статистический анализ экспериментальных и модельных данных. **Таким образом, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, в котором содержится новое решение актуальных задач, важных в теоретическом и практическом планах. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.4. Радиофизика. Работа соответствует критериям, установленным требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013г (ред. от 25.01.2024 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Соискатель, Першин Александр Владимирович, достоин присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.**

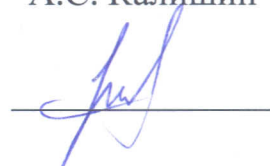
Диссертация заслушана на семинаре отдела геофизики ФГБУ «ААНИИ» 4 сентября 2025 г., отзыв обсуждался на семинаре 4 сентября 2025 г

Отзыв составили:

Председатель семинара отдела геофизики ААНИИ, зав. отделом — вед. научн. сотр. ФГБУ «ААНИИ», к. тех. н. по специальности 05.13.01 — Системный анализ и обработка информации (в технике и технологии).

188800, г. Выборг, пр. Победы, д. 4а, кв. 45
тел. 8(812) 337 3134, E-mail: askalishin@aari.ru

А.С. Калишин



Зав. лаб. радиофизических исследований — глав. науч. сотр. отдела геофизики ФГБУ «ААНИИ», д.ф.-м.н. по специальности 01.03.03 — физика Солнца

195276 г. Санкт-Петербург, ул. Руставели, д.4, кв.35
тел.812 298 1475, E-mail: nataly@aari.nw.ru

Н.Ф. Благовещенская



Я, Калишин А.С., даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«4» сентября 2025 г.



Подпись

Я, Благовещенская Н.Ф., даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«4» сентября 2025 г.



Подпись

Сведения об организации

Фактический адрес: 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, литера А.

Тел.: +7 (812) 337-3123

Сайт: <https://www.aari.ru/>



ПИСЬ (И) А.С. Калишина,
Н.Ф. Благовещенской
ДОСТОВЕРЯЮ

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ААНИИ
 М.А. ГУСАКОВА