

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу
Першина Александра Владимировича
“Экспериментальное исследование и моделирование распространения
коротких радиоволн в спокойной и возмущенной ионосфере”,
представленной к защите на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Общие сведения

Диссертационная 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.

Диссертация состоит из введения, трех глав, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 42 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 139 наименований.

Актуальность темы выполненной работы

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе Першина А.В., относятся к общей проблеме радиофизики – взаимодействию излучения с веществом и, в частности, представлены экспериментальными аспектами распространения радиоволн декаметрового диапазона в динамичной среде низкотемпературной плазмы ионосферы Земли. Важной частью исследований является включение области субавроральной ионосферы, в которой во время геомагнитных возмущений могут проявляться крупномасштабные неоднородности уже авроральной ионосферы в динамике их развития, такие как главный ионосферный провал, авроральный Е-слой ионосферы, существенно меняющие условия прохождения радиоволн. Также следует отметить практическую направленность исследований – попытку прогнозирования ключевого

параметра в практике ионосферного прохождения радиоволн между двумя точками на земной поверхности в виде верхней границы частотного интервала переноса излучения для односкачковой моды 1F2 (максимальной применимой частоты – МПЧ 1F2) на основе математической модели ионосферы и его локальных регистраций.

Общая актуальность исследований повышается в связи с развитием Арктической зоны РФ и значением роли различных коммуникаций в сложных условиях, включая радиосвязь в декаметровом диапазоне радиоволн.

Актуальность темы выполненной работы обоснована.

Цель работы

Измерительной основой работы является технология наклонного радиозондирования ионосферы на основе линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала, на которой построена сеть приемопередающих пунктов, направленная на исследование двух задач:

1. классическая прямая задача радиозондирования ионосферы с регистрацией дистанционно-частотной характеристики ионосферного канала, позволяющей определить предельные частоты мод, в частности, МПЧ 1F2 в различных гелиогеофизических условиях в приложении к средним и высокоширотным регионам РФ;
2. задача диагностики ионосферы - определение волнового вектора волнообразного возмущения ионосферы (перемещающегося ионосферного возмущения - ПИВ) в триангуляционной системе с размерами, сопоставимыми с характерным размером динамической неоднородности ионосферной плазмы.

В соответствии с целями работы полученные результаты представлены в содержании диссертации, которое отражает результаты достаточно представительных экспериментальных исследований по регистрации прохождения радиоволн через ионосферу на среднеширотных и трансавроральных/субавроральных радиотрассах в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях, оценивает возможность прогнозирования базового параметра прохождения радиоволн между двумя точками на земной поверхности – максимально применимой частоты (МПЧ) для односкачковых мод на основе глобальной модели ионосферы. В задаче диагностики структуры и динамики ионосферы автором представлены

результаты регистрации перемещающихся волновых возмущений и математического моделирования динамического радиофизического проявления мощного ПИВ волнового характера.

Во введении обосновывается актуальность темы, которой посвящена диссертационная работа, дано краткие описания материалов по главам диссертации и сформулированы основные положения проведенных исследований, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приводится обзор инструментальной части диссертационной работы – аппаратно-программного комплекса для наклонного зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией. Показано качественное преимущество применяемой технологии в сравнении с традиционными (импульсными) средствами именно в задаче наклонного радиозондирования (НЗ) ионосферы и выделен вклад автора в развитие экспериментальных средств. Представлены примеры ионограмм НЗ, в том числе, в сложных ионосферных условиях. Создан архив экспериментального материала для исследования ионосферного прохождения радиоволн на различных радиотрассах. Показана возможность использования триангуляционной сети ионозондов НЗ для регистрации и оценки скорости и направления движения ПИВ. Наиболее значимым результатом, по-видимому, является одновременная регистрация ПИВ по сечениям в диагностическом треугольнике, что, безусловно, важно в задачах моделирования радиофизического отклика в динамике локализованных возмущений ионосферной плазмы в трехмерной среде.

Во **второй** главе представлены основные экспериментальные результаты и моделирование прохождения радиоволн на радиотрассах наклонного зондирования ионосферы в различных гелиогеофизических условиях для неоднородной ионосферной плазмы и их анализ в двумерно-неоднородном приближении описания распространения сигнала. Реализован и верифицирован метод экстраполяции максимальной применимой частоты для радиотрасс различной ориентации, но имеющих общую связную область отражения с опорными диагностическими сечениями ионосферы, на которых имеются измеренные значения МПЧ 1F2. Следует выделить результат регистрации полной блокировки прохождения (“blackout”) диагностического радиоизлучения во время сильной геомагнитной бури на радиотрассе Салехард – Васильсурск 13-14 октября 2016 г. и результаты регистрации отражения от аврорального слоя E ионосферы (образован ионизирующим

действием высыпающих из магнитосферы заряженных частиц солнечного ветра).

В **третьей** главе выполнено математическое моделирование (в рамках геометрической оптики неоднородных сред) ионосферного распространения радиоволн в краевой (двухточечной) задаче в условиях трехмерно-неоднородной ионосферной плазмы, приводящих к отклонению луча от плоскости дуги большого круга и, в итоге, к азимутальным отклонениям в точке приема. Наиболее интересным результатом является математическое моделирование в трехмерной задаче динамики прохождения ПИВ на слабонаклонной радиотрассе Васильсурск (нагревный стенд “Сура”) – Нижний Новгород с дальностью 130 км. Моделирование на основе модели ионосферы и волновой формы ПИВ проясняет как сам радиофизический отклик, так и некоторые физические аспекты в полученных экспериментальных результатах, что делает цикл исследований логически завершенным в соответствии с задачами, сформулированными в целях диссертационной работы.

Таким образом, автор в целом провел успешные комплексные исследования по особенностям ионосферного распространения радиоволн, включая радиотрассы с отражением в субавроральных областях ионосферы. Выполнены оценки скорости и направления перемещения волновых возмущений ионосферы на основе созданной сети диагностических радиотрасс в европейской части России.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- корректно поставленными и выполненными экспериментальными исследованиями на современном инструментальном уровне;
- математическим моделированием экспериментальных результатов на основе современных моделей ионосферы и методов расчета переноса излучения через ионосферную плазму;
- апробацией основных научных результатов на международных конференциях и их публикацией в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ;

Новизна исследований и научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, заключается в следующем:

1. в разработке и верификации метода экстраполяции максимальной применимой частоты на односкачковые радиотрассы различной ориентации по текущим измерениям МПЧ на реперных радиотрассах, имеющих общую связную область отражения:
2. в определении направленно-скоростных характеристик волновых ПИВ по данным наклонного ЛЧМ радиозондирования на сети среднеширотных радиотрассе небольшой протяженности, сопоставимой с характерным размером перемещающегося возмущения.

Имеются некоторые замечания и рекомендации по диссертационной работе Першина А.В.:

1. Выбор направления волнового вектора ПИВ в плоскости диагностической радиотрассы с азимутом прихода в 83° недостаточно освещен в третьей главе диссертации. Представляется, что можно были привести результаты моделирования с ортогональным к радиотрассе направлением волнового вектора (173°), тем более что триангуляционные измерения движения волнового возмущения в гл. 1 дают направление в 160° .
2. Не совсем понятно, как при ортогональном положении волнового фронта перемещающегося возмущения к плоскости радиотрассы может формироваться значимое азимутальное отклонение в пункте приема.

Заключение

Диссертационная работа Першина Александра Владимировича на тему “Экспериментальное исследование и моделирование распространения коротких радиоволн в спокойной и возмущенной ионосфере”, представляет собой цельное исследование, дающее конкретные обоснованные результаты исследований в области динамики ионосферной плазмы и распространения радиоволн в ионизированной части атмосферы Земли. Результаты диссертации, без сомнения, будут использованы другими исследователями в проблеме понимания сложной структуры ионосферы, ее математического моделирования, верификации на экспериментальных данных радиозондирования, особенно в ее авроральной (субавроральной) части.

Диссертационная работа Першина А.В., представленная в совет 24.2.340.03, созданного на базе Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, соответствует паспорту специальности

1.3.4. – Радиофизика, а именно пункту 5: Разработка новых методов и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач и всем критериям, установленным “Положением о присуждении учёных степеней”, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 25.01.2024 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Першин Александр Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Официальный оппонент,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.

Н.В. Пушкова Российской академии наук, лаборатория моделирования волновых полей в ионосфере, ведущий научный сотрудник,

и. о. зав. лабораторией моделирования волновых процессов в ионосфере

доктор физ.-мат. наук,
01.04.03 - Радиофизика

И.В. Крашенинников

108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4, ИЗМИРАН.

Тел. +7(495)8510279 e-mail: krash@izmiran.ru.

Выражаю свое согласие на обработку персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Подпись Игоря Васильевича Крашенинникова заверяю

Директор ИЗМИРАН,
кандидат физ.-мат. наук



А.А. Абуни

“ 03 ” сентября 2025 г.