

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

УДК 551.501:621.396.96

Никитина Виктория Сергеевна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН ПРИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ**

Специальность 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Санкт–Петербург

2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «РГГМУ»

Научный руководитель:	Жуков Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет, профессор кафедры Экспериментальной физики атмосферы, г. Санкт-Петербург
Официальные оппоненты:	Аджиев Анатолий Хабасович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт», заведующий отделом стихийных явлений, г. Нальчик Маков Александр Борисович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия им А. Ф. Можайского», г. Санкт-Петербург
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-кавказский федеральный университет», г. Нальчик

Защита диссертации состоится «11» февраля 2027 года на заседании диссертационного совета 24.2.365.02 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «__» 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



В. А. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования заключается в необходимости повышения точности радиолокационных наблюдений в условиях изменяющегося состояния атмосферы. Радиолокаторы широко используются для решения задач гидрометеорологии, управления воздушным движением, навигации, мониторинга окружающей среды, обеспечения безопасности и контроля воздушного пространства. Точность определения координат наблюдаемых объектов во многом зависит от условий распространения электромагнитных волн в атмосфере.

Одним из основных факторов, влияющих на результаты радиолокационных наблюдений, является атмосферная рефракция. Изменение температуры воздуха, атмосферного давления и влажности приводит к изменению коэффициента преломления атмосферы и искривлению траектории распространения радиоволн. Вследствие этого возникают систематические ошибки определения координат объектов, изменяются дальность и высота их обнаружения, появляются ложные цели, ухудшается точность интерпретации радиолокационной информации.

Для метеорологических радиолокаторов влияние рефракции имеет важное значение, поскольку приводит к ошибкам определения высоты облачности, характеристик зон осадков и других параметров атмосферных процессов, что снижает эффективность обнаружения и сопровождения опасных метеорологических явлений, ухудшает качество краткосрочных прогнозов и ограничивает возможности оперативного гидрометеорологического обеспечения. Однако проблема учета рефракции не ограничивается задачами метеорологии и является общей для широкого круга радиолокационных систем различного назначения.

Несмотря на наличие теоретических и экспериментальных исследований в области распространения радиоволн в атмосфере, существующие методы учета рефракции в большинстве случаев основаны на использовании стандартной атмосферы и не учитывают фактическую пространственно-временную изменчивость метеорологических параметров. В связи с этим разработка методов прогнозирования и учета рефракции радиоволн на основе данных о реальном состоянии атмосферы является актуальной научной задачей, имеющей важное значение как для радиолокационной метеорологии, так и для теории и практики радиолокации в целом.

Целью диссертационной работы является разработка метода прогнозирования и учета рефракции радиоволн при радиолокационных

наблюдениях на основе анализа пространственно-временной изменчивости метеорологических параметров атмосферы.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

- проанализировано влияние изменчивости метеорологических параметров на рефракцию радиоволн;
- исследованы пространственные характеристики коэффициента преломления;
- произведена оценка погрешностей, обусловленных рефракцией, при радиолокационных измерениях;
- исследовано влияние подстилающей поверхности на условия распространения радиоволн;
- произведен анализ условий возникновения сверхрефракции и моделирование соответствующих процессов;
- разработан метод учета и прогноза рефракции в различных метеорологических условиях.

Объектом исследования являются процессы распространения электромагнитных волн в тропосфере Земли.

Предметом исследования являются закономерности формирования рефракции радиоволн и влияние пространственно-временной изменчивости коэффициента преломления атмосферы на результаты радиолокационных наблюдений.

Разрешаемое противоречие состоит в необходимости учета фактических условий распространения радиоволн при решении задач радиолокации и отсутствии методов оперативного получения информации о реальном пространственно-временном распределении коэффициента преломления атмосферы.

Методами исследования являлись:

Теоретическую основу исследования составили положения физики атмосферы, радиометеорологии и теории распространения электромагнитных волн в неоднородных средах.

В качестве теоретических методов исследования использовались методы математического моделирования процессов распространения электромагнитных волн в атмосфере, методы математической статистики, корреляционного анализа и численного моделирования.

Экспериментальную основу исследования составили данные аэрологических, радиолокационных и метеорологических наблюдений.

В качестве практических методов исследования применялись методы обработки и анализа аэрологических, радиолокационных и

метеорологических данных, методы сравнительного анализа результатов наблюдений и результаты натурных наблюдений случаев возникновения рефракции и сверхрефракции радиоволн.

Научная новизна состоит в том, что:

- впервые для решения задач радиолокации (в том числе радиолокационной метеорологии) выполнена оценка пространственной корреляции коэффициента преломления атмосферы и определены пределы его пространственной экстраполяции;
- установлено отсутствие значимых пространственных корреляционных связей коэффициента преломления на расстояниях порядка нескольких сотен километров;
- установлена определяющая роль слоя атмосферы высотой от 30 до 1500 м в формировании погрешностей радиолокационных наблюдений;
- разработан метод прогнозирования рефракции радиоволн по данным локальных метеорологических наблюдений;
- предложена модель формирования сверхрефракции над водной поверхностью.

Научная значимость работы:

1. Полученные оценки влияния различных профилей коэффициента преломления атмосферы на траекторию радиолуча и погрешности радиолокационных измерений позволили установить количественную связь между условиями рефракции и ошибками определения координат целей.
2. Исследованные пространственные стохастические зависимости коэффициента преломления атмосферы определяют пределы пространственной экстраполяции его значений по высоте и в горизонтальной плоскости.
3. Предложенный метод прогноза рефракции радиоволн основан на использовании локальных метеорологических наблюдений для оценки условий распространения радиоволн и связанных с ними погрешностей радиолокационных измерений.
4. Созданная модель формирования особых условий распространения радиоволн над протяженной водной поверхностью при наличии приподнятой температурной инверсии описывает механизм возникновения сверхрефракции над водными объектами.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для повышения точности радиолокационных наблюдений, а также для прогнозирования условий распространения радиоволн в задачах метеорологической и классической радиолокации.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Корреляционные связи коэффициента преломления атмосферы по высоте, определяющие пределы вертикальной экстраполяции его значений при прогнозировании рефракции радиоволн.
2. Корреляционная зависимость коэффициента преломления атмосферы в горизонтальной плоскости, характеризующая пространственные масштабы однородности условий распространения радиоволн.
3. Метод прогнозирования величины рефракции радиоволн по данным метеорологических измерений у антенны радиолокатора, основанный на статистических зависимостях коэффициента преломления атмосферы.
4. Модель формирования сверхрефракции над водной поверхностью, основанная на призматической структуре распределения линий равных значений коэффициента преломления.
5. Метод прогнозирования рефракции радиоволн над водной поверхностью, учитывающий наличие приподнятой температурной инверсии.
6. Метод учета рефракции при определении координат радиолокационной цели, позволяющий оценивать и компенсировать погрешности определения ее координат.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы подтверждается всесторонним анализом предшествующих научных работ в области обработки сигналов, принимаемых метеорологическим радиолокатором, корректностью постановки научных задач исследования, строгостью принятых допущений и ограничений, логической непротиворечивостью рассуждений, а также корректным использованием современного математического аппарата. Достоверность основных результатов исследований подтверждается соответствием результатов экспериментов выводам теоретических вычислений, непротиворечивостью частных результатов исследования результатам других авторов; апробацией на всероссийских научно-технических конференциях и семинарах кафедры; публикацией результатов в ряде ведущих научных изданий.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате» по следующим пунктам:

1. Методы наблюдений, измерений и обработки данных об атмосфере и климатической системе. Применение радиолокационной аппаратуры. Микроволновое зондирование.

2. Строение атмосферы. Приземный и пограничный слой. Строение и физика нижней атмосферы (тропосферы).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- Всероссийской открытой научной конференции «Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (Муром, 2023, 2024, 2025, 2026);
- Научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Новые материалы и энергетика в ВС РФ» (Анапа, 2024);
- V Международной научно-практической конференции «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях» (Санкт-Петербург, 2024);
- XXXIII Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2024);
- Региональном постоянно действующем семинаре «Дистанционные методы зондирования природной среды» (Санкт-Петербург, 2024, 2025);
- VIII Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2025);
- The 13th European conference on radar in meteorology and hydrology (Belgrade, 2026).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 статей, в том числе 6 из них в журналах, рекомендованных перечнем ВАК: «Метеорология и гидрология», «Гидрометеорология и экология», «Труды военно-космической академии им. А. Ф. Можайского», «Радиотехнические и телекоммуникационные системы». По теме диссертации в соавторстве опубликовано одно учебное пособие.

Личный вклад автора.

Все научные результаты, выносимые на защиту, получены автором по личной инициативе.

Автором самостоятельно выполнены сбор и обработка исходных аэрологических, метеорологических и радиолокационных данных, проведение всех расчетов и численного моделирования. Автором выполнена установка метеорологической станции, использованной для получения экспериментальных данных. Разработка метода прогнозирования рефракции радиоволн и анализ результатов исследований выполнены автором лично.

Помимо прочего, автором подготовлены материалы для докладов на научных конференциях, публикаций в различные журналы и разработки учебного пособия.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 148 страниц машинописного текста, включая 59 формул, 42 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 42 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки метода прогнозирования рефракции радиоволн, сформулированы цели работы, поставлены задачи, обозначены объект и предмет исследования. Показаны теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассмотрены физические основы распространения электромагнитных волн в атмосфере Земли. Приводится обзор истории и современного состояния исследований в области учета рефракции радиоволн.

Выполнен анализ существующих методов учета рефракции радиоволн, применяемых в радиолокационной метеорологии. Установлено, что большинство используемых на практике подходов основано на предположении о стандартном состоянии атмосферы и не учитывает реальную пространственно-временную изменчивость метеорологических параметров. Это приводит к погрешностям при определении координат расположения метеорологических объектов.

На примере данных сети доплеровских метеорологических радиолокаторов проведена оценка влияния рефракции на результаты наблюдений. Показано, что расхождения между результатами наблюдений одного и того же метеорологического образования различными радиолокаторами не могут быть объяснены только инструментальными ошибками измерений. Установлено, что основной причиной наблюдаемых различий является изменчивость условий распространения радиоволн в атмосфере.

Проведенный анализ показал необходимость разработки методов оперативного прогнозирования и учета рефракции радиоволн, основанных на фактических данных о состоянии атмосферы в районе места установки радиолокатора.

Во **второй главе** исследованы пространственные характеристики коэффициента преломления атмосферы. Показано, что корреляционная связь между значениями коэффициента преломления воздуха в районе установки двух радиолокаторов, зоны покрытия которых пересекаются, отсутствует. Значения полученных коэффициентов корреляции R для летних месяцев 2024 года в сроки 00 и 12 часов ВСВ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов корреляции, полученные для станций Санкт–Петербург и Бологое

R, Бологое–Санкт–Петербург		
Высота, м	00 ч	12 ч
500	0,01	–0,06
2000	0,14	–0,04

Отсутствие корреляции является причиной потери качества при стыковке карт с разных радиолокаторов и подтверждает вывод о необходимости учета особенностей среды распространения электромагнитной волны для каждого локатора отдельно.

Для оценки влияния вертикального профиля коэффициента преломления на распространение радиоволн использовалась модель распространения электромагнитных волн в неоднородной сферически-слоистой атмосфере. Расчеты выполнялись на основе решения уравнения траектории радиоволны в среде с переменным коэффициентом преломления при различных углах места антенны. Это позволило определить погрешности радиолокационных измерений для различных профилей коэффициента преломления атмосферы.

Структура такой модели представлена на рисунке 1. Модель позволяет учитывать реальное вертикальное распределение коэффициента преломления и рассчитывать траекторию радиолокационного луча для различных типов стратификации атмосферы.

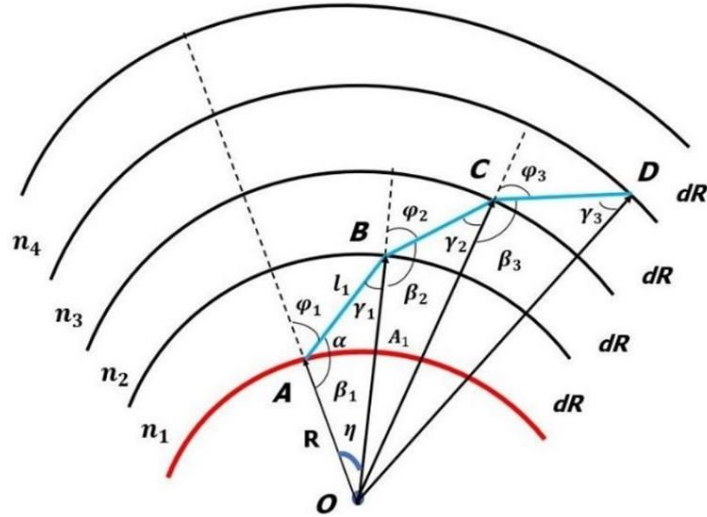


Рисунок 1 – Геометрическая модель радиолуча в сферически слоистой атмосфере. Здесь: α – угол места антенны; φ – угол преломления радиолуча; γ – угол падения радиолуча; l – длина луча в каждом слое атмосферы; dR – добавка к радиусу Земли R (в данном случае составляет 100 м); n – значение коэффициента преломления в каждом слое; β – угол между радиус–вектором и направлением луча в каждом слое; B, C, D – точки перехода радиолуча между границами двух слоев атмосферы

С учетом такой модели угол преломления луча в каждом k -ом слое атмосферы описывается следующим выражением:

$$\sin \varphi_k = \frac{n_{k-1}}{n_k} * \frac{(R+(k-2)dR) * \sin \varphi_{k-1}}{R+(k-1)dR} \quad (1)$$

Длина луча в каждом k -ом слое может быть найдена по формуле:

$$l_k = \frac{(R+(k-1)dR * \sin(\beta_k + \gamma_k))}{\sin \gamma_k} \quad (2)$$

Наклонная дальность, необходимая для расчета погрешностей, которые различные типы рефракции вносят в определение координат цели, в таком случае представляет собой суммарную величину длин луча в каждом слое атмосферы:

$$l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n = L = \sum_{i=1}^k l_i \quad (3)$$

Высота точек перехода луча через границу двух последовательных слоев:

$$H = k * dR, \quad (4)$$

С использованием модели проведена оценка влияния различных атмосферных слоев на величину погрешностей, вызванных рефракцией, в определении координат целей. Показано, что основной вклад в изменение траектории радиоволны вносит слой атмосферы от 30 до 1500 м. Расчетные значения погрешностей при истинной высоте цели 4029 м и угле места антенны $0,5^\circ$ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения погрешностей высоты обнаружения целей и горизонтальной дальности для угла места антенны $0,5^\circ$ (опорная высота обнаружения цели $H = 4029$ м)

Тип рефракции в изменяемом слое	$\frac{dN}{dz}$ в изменяемом слое	Слой, м	Высота при $L = 200\,000$ м	Погрешность по высоте ΔH , м	Погрешность по горизонтальной дальности ΔX , м
Пониженная	$-2 \cdot 10^{-6}$	0–1500	5825 м	+ 274 м	0
		1600–3500	5804 м	+ 88 м	0
		3800–5500	5775	+ 2 м	0
Сверхрефракция	$-20 \cdot 10^{-6}$	0–1500	4662 м	–	–
		1600–3500	5088 м	– 716 м	+50 м
		3800–5500	5504 м	– 11 м	+30 м
Отрицательная	$4 \cdot 10^{-6}$	0–1500	6013 м	+ 1021 м	–30 м
		1600–3500	5950 м	+ 345 м	+100 м
		3800–5500	5844 м	+ 4 м	0

Дальнейший раздел посвящен построению модели рефракции в атмосфере Земли. Основой для ее разработки послужили результаты корреляционного анализа коэффициента преломления атмосферы. Вертикальные корреляционные связи оценивались по данным аэрологического зондирования, на основании которых рассчитывались профили коэффициента преломления атмосферы. Горизонтальные корреляционные связи определялись по данным синхронных метеорологических наблюдений на пунктах, расположенных на различных расстояниях друг от друга. Проведенные исследования показали, что пределы экстраполяции коэффициента преломления (и, следовательно, типа

рефракции) ограничиваются областью 100 км в диаметре и 700 м по высоте. Также был сделан вывод о том, что экстраполяция коэффициента преломления возможна только в условиях устойчивой атмосферы при отсутствии резких градиентов метеорологических величин. Поскольку статистически значимые корреляционные связи коэффициента преломления сохраняются лишь на ограниченных расстояниях, является необходимым использование локальной информации о состоянии атмосферы для решения задач учета и прогноза рефракции радиоволн.

В **третьей главе** исследовано влияние подстилающей поверхности на формирование различных типов рефракции радиоволн. Показано, что процессы тепло- и влагообмена между атмосферой и подстилающей поверхностью оказывают существенное влияние на формирование вертикального распределения температуры и влажности воздуха, определяющих величину коэффициента преломления атмосферы.

Установлено, что характер формирования условий для возникновения различных типов рефракции существенно различается над сушей и водной поверхностью. Над сушей вертикальное распределение температуры и влажности определяется преимущественно радиационным балансом подстилающей поверхности и процессами турбулентного перемешивания воздуха. Над водной поверхностью дополнительное влияние оказывает высокая теплоемкость воды, вследствие чего температура водоема изменяется значительно медленнее температуры воздуха.

Установлено, что характер рефракции радиоволн определяется сочетанием двух основных факторов: типом подстилающей поверхности и наличием температурной инверсии. Это позволило выделить четыре характерных типа условий распространения радиоволн: над сушей и водной поверхностью при наличии и отсутствии температурной инверсии, для которых исследованы особенности формирования коэффициента преломления атмосферы.

Показано, что использование данных удаленных аэрологических станций не позволяет корректно учитывать условия распространения радиоволн в районе расположения радиолокатора вследствие локального характера пространственной зависимости коэффициента преломления атмосферы. На основании результатов, полученных во второй главе, предложен метод прогнозирования рефракции, основанный на использовании данных локальных метеорологических наблюдений. Структурная схема такого подхода представлена на рисунке 2



Рисунок 2 – Структурная схема метода прогнозирования рефракции радиоволн

Следует отметить, что наличие температурной инверсии (как приземной, так и приподнятой) над сушей не приводит к изменению структуры метода прогноза. Отдельная процедура используется только для случая распространения радиоволн над водной поверхностью при наличии приподнятой температурной инверсии, что сопровождается развитием сверхрефракции.

Для реализации метода прогнозирования рефракции радиоволн используются данные локальных измерений температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности на высоте расположения

антенны радиолокатора. На основании измеренных значений относительная влажность пересчитывается в парциальное давление водяного пара, после чего по формуле Фрума–Эссена (формула 5) определяется коэффициент преломления атмосферы на уровне установки антенны.

$$(n - 1) * 10^6 = \frac{78}{T} (P + \frac{4800e}{T} - \frac{e}{7}), \quad (5)$$

где n – величина коэффициента преломления, T – температура воздуха в Кельвинах, P – атмосферное давление, e – парциальное давление водяного пара.

Полученное значение коэффициента преломления используется в качестве исходного параметра для расчета его вертикального распределения. Экстраполяция коэффициента преломления по высоте осуществляется на основе статистической зависимости (формула 6), параметры которой определялись автором по результатам обработки данных аэрологического зондирования и данных с локальной метеостанции.

$$n(h) = \mu_n(h) + R(h) \frac{\sigma_h}{\sigma_0} (\mu_{n0} - \tilde{n}_0), \quad (6)$$

где $n(h)$ – расчетное значение коэффициента преломления на высоте h над антенной; μ_{n0} и $\mu_n(h)$ – математическое ожидание коэффициента преломления на высоте антенны и на высоте h соответственно; $R(h)$ – коэффициент автокорреляции коэффициента преломления на высоте h ; σ_0 и $\sigma_n(h)$ – дисперсии коэффициента преломления на высоте антенны и на высоте h соответственно; $\tilde{n}_0$ – оценка коэффициента преломления на высоте антенны.

Полученные во второй главе оценки корреляционных связей коэффициента преломления показывают, что область применимости метода ограничивается радиусом 50 км в горизонтальном направлении и 700 м по высоте, в пределах которых сохраняются статистически значимые корреляционные зависимости.

Рассчитанный профиль коэффициента преломления позволяет определить ожидаемые условия распространения радиоволн и выявить случаи возникновения рефракции, отличной от стандартной. Таким образом, метод обеспечивает прогноз условий возникновения рефракции разных типов на основе данных метеорологических наблюдений непосредственно в месте расположения радиолокатора.

Полученные результаты подтвердили возможность корректного прогнозирования рефракции при различных сочетаниях характеристик подстилающей поверхности и температурной стратификации атмосферы.

Исключение составили случаи распространения радиоволн над водной поверхностью при наличии приподнятой температурной инверсии. Для таких условий по данным радиолокационных наблюдений в районе Ладожского

озера были выявлены случаи сверхрефракции, не описываемые предложенной моделью (рисунок 3).

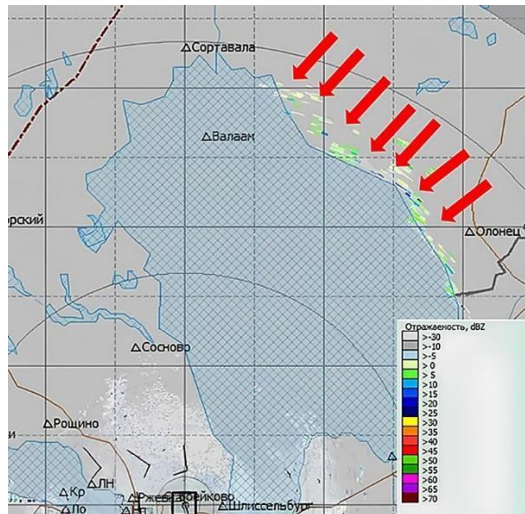


Рисунок 3 - Случай сверхрефракции по берегу Ладожского озера, зарегистрированный ДМРЛ–С Воейково 10 сентября 2024 года в 12.00 ВСВ

Полученный результат свидетельствует о наличии дополнительных физических механизмов формирования коэффициента преломления атмосферы над крупными водоемами и необходимости дальнейшего развития метода для учета условий возникновения сверхрефракции.

В четвертой главе исследованы механизмы формирования сверхрефракции радиоволн над Ладожским озером и разработан метод восстановления вертикального профиля коэффициента преломления атмосферы над водной поверхностью в условиях отсутствия прямых аэрологических наблюдений.

Выдвинута гипотеза, что при наличии инверсии над озером формируется особая структура атмосферы, обусловленная бризовой циркуляцией и переносом влажного воздуха с поверхности водоема. Такая структура представляет собой призму, образованную линиями равных значений парциального давления водяного пара и, соответственно, коэффициента преломления (рисунок 4). В результате в прибрежной зоне возникает область с наклонными поверхностями равных значений коэффициента преломления, имеющая клиновидную форму. Расчеты показали, что угол наклона таких поверхностей изменяется в пределах от 1,5 до 4,7° в зависимости от высоты инверсионного слоя.

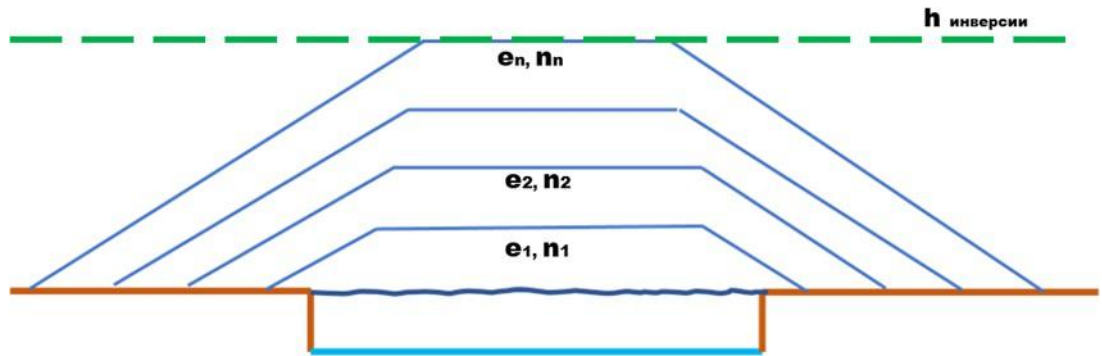


Рисунок 4 – Призма, образованная линиями равных значений парциального давления водяного пара (так же и коэффициента преломления)

В условиях отсутствия аэрологических наблюдений над акваторией озера разработан метод восстановления вертикального профиля коэффициента преломления атмосферы. Метод основан на использовании данных аэрологического зондирования над сушей, сведений о температуре поверхности воды и выявленных закономерностей пространственной корреляции коэффициента преломления. Для восстановления профиля коэффициента преломления над водной поверхностью предложена следующая зависимость:

$$n_h = n_b - kh, \quad (7)$$

где n – восстановленные значения коэффициента преломления на высоте h , n_b – значение коэффициента преломления на границе раздела воды и воздуха, k – градиент высотного распределения коэффициента преломления, рассчитанный по формуле:

$$k = \frac{n_b - n'}{h_{и}} \quad (8)$$

где n' – значения коэффициента преломления на высоте нижней границы инверсионного слоя $h_{и}$.

Выражения 7 и 8 позволяют определять значения коэффициента преломления на различных высотах по известным значениям на поверхности воды и на нижней границе инверсионного слоя.

На основе восстановленных профилей коэффициента преломления выполнено моделирование траекторий распространения радиоволн над Ладожским озером. Показано, что в условиях приподнятой температурной инверсии и повышенного влагосодержания воздуха над водной поверхностью возникают условия для существенного искривления траектории радиолокационного луча и формирования сверхрефракции, приводящей к появлению ложных радиолокационных целей.

Все вышесказанное позволяет количественно оценивать отклонение траектории радиоволн от условий нормальной рефракции и может быть использовано для учета сверхрефракции не только над Ладожским озером, но и над другими крупными водоемами при наличии информации о местных метеорологических условиях.

В пятой главе выполнена апробация разработанного метода прогнозирования рефракции радиоволн на примере случаев сверхрефракции над Ладожским озером.

На основе результатов, полученных в предыдущих главах, установлено, что для территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области преобладающими типами рефракции являются пониженная и нормальная. В то же время в условиях приподнятой температурной инверсии над Ладожским озером наблюдаются случаи сверхрефракции радиоволн, не описываемые базовой версией разработанного метода. Для учета таких ситуаций метод был дополнен моделью распространения радиолуча над водной поверхностью.

По разработанному методу выполнен прогноз типа рефракции для всех месяцев 2024 года. Установлено, что в большинстве случаев над сушей и над водной поверхностью при отсутствии приподнятой температурной инверсии реализуются условия пониженной или нормальной рефракции. Для периода второй половины августа и сентября 2024 года выявлено 14 случаев приподнятой температурной инверсии, для которых были восстановлены профили коэффициента преломления над Ладожским озером и рассчитаны траектории распространения радиолуча.

Результаты моделирования показали, что в условиях приподнятой инверсии и сформированной призматической структуры распределения коэффициента преломления происходит значительное искривление траектории радиолокационного луча. Во всех исследованных случаях луч достигал земной поверхности на расстоянии около 169 км от радиолокатора, что соответствует расстоянию до северного берега Ладожского озера. Типичная траектория электромагнитной волны в этом случае представлена на рисунке 5.

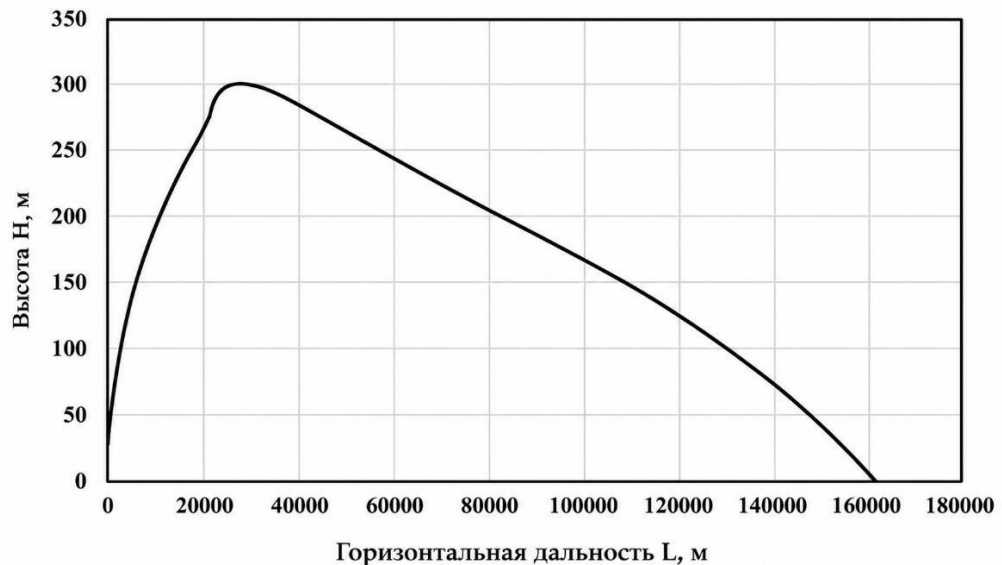


Рисунок 5 – Типичная траектория распространения радиолуча в призме над Ладожским озером

Сопоставление результатов прогноза с данными наблюдений ДМРЛ-С Воейково показало полное соответствие расчетных и фактических случаев возникновения сверхрефракции. Для исследуемой выборки оправдываемость прогноза составила 100%.

Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной модели восстановления профиля коэффициента преломления над водной поверхностью и свидетельствуют о возможности использования предложенного метода для прогнозирования и учета сверхрефракции радиоволн над крупными водоемами.

В заключении представлены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе, которые заключаются в следующем:

1. Установлено, что существенные расхождения в определении координат и высот метеорологических объектов при наблюдении одних и тех же явлений различными радиолокаторами обусловлены преимущественно изменчивостью метеорологических условий и связанной с ними рефракцией радиоволн.

2. Исследованы горизонтальные и высотные характеристики коэффициента преломления атмосферы. Показано отсутствие значимых пространственных корреляционных связей коэффициента преломления на расстояниях порядка нескольких сотен километров, что свидетельствует о локальном характере условий возникновения рефракции и необходимости их индивидуального учета для каждого радиолокатора.

3. Установлено, что наибольшее влияние на формирование погрешностей вследствие рефракции оказывают нижние слои атмосферы

высотой до 1500 м, в пределах которых наблюдаются максимальные вертикальные градиенты температуры и влажности воздуха.

4. Произведена количественная оценка влияния вертикального профиля коэффициента преломления на траекторию радиолуча и точность определения координат наблюдаемых объектов с помощью модели распространения электромагнитной волны в сферически-слоистой атмосфере.

5. Показано, что использование стандартной атмосферы не обеспечивает адекватного описания реальных условий распространения радиоволн вследствие значительной изменчивости профиля коэффициента преломления в зависимости от текущего состояния атмосферы.

6. Исследовано влияние подстилающей поверхности на условия распространения радиоволн. Установлено, что сочетание вида подстилающей поверхности и наличия температурной инверсии определяет особенности формирования вертикального профиля коэффициента преломления и условия возникновения различных типов рефракции.

7. Выдвинута гипотеза о том, что над крупными водными объектами при наличии приподнятой температурной инверсии формируется пространственная структура распределения коэффициента преломления, обеспечивающая возникновение сверхрефракции радиоволн.

8. На примере Ладожского озера предложено физическое объяснение механизма формирования сверхрефракции над крупными водоемами. Показано, что необходимыми условиями ее возникновения являются наличие приподнятой температурной инверсии, повышенная влажность приземного слоя атмосферы и динамическая устойчивость воздушных масс.

9. Разработан метод учета и прогноза рефракции радиоволн, основанный на использовании локальных метеорологических наблюдений, данных аэрологического зондирования и статистических характеристик распределения коэффициента преломления атмосферы.

10. Выполнена апробация разработанного метода. Показано, что его применение позволяет корректно прогнозировать условия возникновения различных типов рефракции и учитывать их влияние при интерпретации радиолокационной информации. Для исследуемой выборки случаев сверхрефракции над Ладожским озером оправдываемость прогноза составила 100 %.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Моделирование влияния рефракции на определение координат целей при производстве радиолокационных наблюдений. // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2023. Вып. 688. С. 55-61.

2. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Исследование возможности прогнозирования искривления траектории радиоволн в тропосфере Земли. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. Вып. 3 (55). С. 5-15.

3. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Построение траектории распространения СВЧ-излучения в неоднородной атмосфере. // Гидрометеорология и экология. 2025. Вып. 78. С. 20-41.

4. Кузнецов А. Д., Крюкова С. В., Никитина В. С., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Статистическая экстраполяция профиля индекса коэффициента преломления. // Гидрометеорология и экология. 2025. Вып. 79. С. 292-306.

5. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С., Щукин Г. Г. Разработка метода прогнозирования рефракции радиоволн в тропосфере. // Метеорология и гидрология. 2026. Вып. 2. С. 97-101.

6. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С., Симакина Т. Е. Модельное представление возникновения сверхрефракции радиоволн сантиметрового диапазона над обширными водными поверхностями на примере Ладожского озера. // Гидрометеорология и экология. 2026. Вып. 83. С. 294-304.

Труды конференций:

1. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Моделирование влияния рефракции на траекторию распространения радиоволн в атмосфере. Материалы всероссийской открытой научной конференции «Всероссийские открытые Арmandовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром: Изд. «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2023. С. 123-133.

2. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Оценка влияния рефракции в тропосфере на трансформацию радиоволн. // Сборник статей научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития

современной науки по направлению «Новые материалы и энергетика в ВС РФ». Анапа: Изд. «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2024. С. 79-82.

3. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Моделирование влияния рефракции на определение координат целей при производстве радиолокационных наблюдений. // Материалы XXXIII Всероссийского симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Ключева Николая Фомича «Радиолокационное исследование природных сред». СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2024, стр. 511-516.

4. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Никитина В. С., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Построение траектории распространения радиолокационного импульса в неоднородной атмосфере. // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях». СПб: Изд. «Политех-пресс», 2024. С. 310-316.

5. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Оценка возможности прогнозирования рефракции радиоволн. // Материалы всероссийской открытой научной конференции «Всероссийские открытые Арmandовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром: Изд. «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2024. С. 167-174.

6. Кузнецов А. Д., Крюкова С. В., Никитина В. С., Сероухова О. С., Симакина Т. Е. Оценка возможностей статистической экстраполяции профиля индекса коэффициента преломления по данным АС Смоленска. // Материалы всероссийской открытой научной конференции и Молодежной школы-конференции «Всероссийские открытые Арmandовские чтения «Муром 2025». Муром: Изд. «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2025. С. 265-273.

7. Никитина В. С., Кузнецов А. Д., Жуков В. Ю. Разработка модели прогноза рефракции радиоволн для обеспечения работы сети штормооповещения. // Материалы всероссийской открытой научной конференции и Молодежной школы-конференции «Всероссийские открытые Арmandовские чтения «Муром 2025». Муром: Изд. «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2025. С. 259-264.

8. Vladimir Zhukov, Victoria Nikitina. Usage and forecasting radio wave refraction on the Earth's troposphere. The 13th European conference on radar in meteorology and hydrology. Book of abstracts. Belgrade, 2026. P. 323.

Иные публикации:

1. Восканян К. Л., Жуков В. Ю., Крюкова С. В., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С., Симакина Т. Е., Никитина В. С. Атмосферная рефракция радиоволн СВЧ-диапазона. // Учебное пособие. СПб: Изд. «Российский государственный гидрометеорологический университет», 2024. – 102 с.