

**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

Диссертация

На соискание ученой степени кандидата физико–математических наук

Научный руководитель

доктор физ.–мат. наук, профессор

Жуков В. Ю.

Санкт–Петербург

2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕФРАКЦИЮ РАДИОВОЛН И ТОЧНОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	13
1. Проблема учета рефракции радиоволн радиолокационных метеорологических наблюдениях.....	13
2. Изменчивость коэффициента преломления в атмосфере. Типы рефракции радиоволн.....	22
3. Исторический обзор, существующие методы учета рефракции радиоволн в метеорологии и современное состояние проблемы	32
Выводы к первой главе.....	39
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ И ОЦЕНКА СВЯЗАННЫХ С НЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ В РАДИОЛОКАЦИИ.....	41
1. Оценка пространственной связи коэффициентов преломления	41
2. Оценка погрешностей, вносимых рефракцией при производстве радиолокационных наблюдений.....	48
2.1. Моделирование траектории электромагнитной волны радиолокатора в атмосфере	48
2.2. Расчет погрешностей и выводы о влиянии рефракции на траекторию электромагнитной волны	55
2.3. Расчет высотного профиля коэффициента преломления с учетом стандартного распределения влажности в атмосфере	64

3. Построение модели рефракции	67
3.1 Оценка зависимости корреляции коэффициента преломления от высоты .	67
3.2. Оценка радиуса корреляции коэффициента преломления	72
Выводы ко второй главе	84
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В	
НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ НАД СУШЕЙ И ВОДОЕМАМИ.	
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН .	
86	
1. Оценка влияния типа подстилающей поверхности на траекторию	
радиоволны в атмосфере.....	86
1.1. Анализ высотного распределения водяного пара. Влияние суши и	
водоемов на траекторию радиоволны при отсутствии инверсии	
метеопараметров	89
2. Метод прогнозирования рефракции радиоволн	98
2.1. Прогноз рефракции радиоволн над различными подстилающими	
поверхностями при стандартной стратификации метеовеличин и при инверсии	
температуры	102
Выводы к третьей главе	108
ГЛАВА 4. ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ	
СВЕРХРЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН НАД АКВАТОРИЕЙ ЛАДОЖСКОГО	
ОЗЕРА. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ	
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ	
РАДИОЛОКАТОРА	
109	
1. Метеорологические условия, приводящие к возникновению сверхрефракции	
над водоемами. Анализ синоптической ситуации над Ладожским озером при	
наличии сверхрефракции.....	109

2. Моделирование траектории электромагнитной волны в призме, образованной над Ладожским озером	124
3. Восстановление высотного распределения коэффициента преломления над озером. Построение траектории электромагнитной волны	130
Выводы к четвертой главе.....	134
ГЛАВА 5. АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ДЛЯ СЛУЧАЯ СВЕРХРЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования заключается в необходимости повышения точности радиолокационных наблюдений в условиях изменяющегося состояния атмосферы. Радиолокаторы широко используются для решения задач гидрометеорологии, авиации, управления воздушным движением, навигации, мониторинга окружающей среды, обеспечения безопасности и контроля воздушного пространства. Точность определения координат, высоты и других характеристик 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.

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.

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.

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.

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 общей 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.

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.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- Всероссийской открытой научной конференции «Всероссийские открытые Арmandовские 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.

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.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертационной работы, приводится научная и практическая значимость, новизна полученных результатов, а также апробация работы.

В первой главе представлен исторический обзор на проблему рефракции радиоволн, а также обзор современного состояния исследований распространения радиоволн в атмосфере и влияния рефракции на точность радиолокационных измерений. Рассмотрены физические основы формирования

высотного профиля коэффициента преломления, его зависимость от метеорологических параметров, а также существующие подходы к учёту рефракции при интерпретации радиолокационных данных.

Во второй главе проанализирована пространственная корреляция коэффициента преломления и установлено, что на расстоянии порядка нескольких сотен километров корреляция не превышает 0,2. Произведена оценка погрешностей координат целей, связанных с различными типами рефракции в атмосфере. Установлено, что наибольшие погрешности наблюдаются в нижних слоях атмосферы и достигают максимальных значений при сверхрефракции. В главе также подчеркивается, что стандартная атмосфера не описывает реальное распределение коэффициента преломления, поскольку, согласно проведенным расчетам, реальный высотный профиль коэффициента преломления отличается от стандартного. Установлено, что физический предел вертикальной и горизонтальной экстраполяции значений коэффициента преломления составляет 700 м по высоте и 50 км по горизонтали, что определяет область, в пределах которой можно прогнозировать предполагаемый тип рефракции радиоволн.

В третьей главе исследовано влияние подстилающей поверхности и метеорологических параметров на условия распространения радиоволн в атмосфере. Рассмотрены особенности формирования вертикального распределения коэффициента преломления над сушей и водной поверхностью и их влияние на траекторию радиолокационного луча. Показано, что влияние водной поверхности наиболее существенно при распространении радиоволн в приземном слое атмосферы вблизи радиолокатора и уменьшается с увеличением расстояния вследствие роста высоты распространения луча. На основе полученных результатов предложен метод прогнозирования рефракции радиоволн, основанный на использовании локальных метеорологических измерений на уровне расположения антенны радиолокатора. Произведена

апробация метода при условиях стандартного распределения метеовеличин и наличия температурной инверсии.

В четвертой главе предложена физическая модель формирования сверхрефракции над водной поверхностью, основанная на гипотезе о призматической структуре распределения линий равных значений коэффициента преломления. Показано, что в условиях приподнятой температурной инверсии и устойчивой стратификации атмосферы в подинверсионном слое, формируется клиновидная область повышенного градиента коэффициента преломления, распространяющаяся от водной поверхности в сторону суши. В пределах данной области происходит искривление радиолуча по типу сверхрефракции. Показано, что наличие такой призматической структуры приводит к формированию нетипичных траекторий распространения радиоволн и должно учитываться при интерпретации радиолокационных данных.

В пятой главе выполнена апробация разработанной методики прогноза и учёта рефракции радиоволн на примере случаев сверхрефракции над Ладожским озером. На основе данных радиолокационных наблюдений и аэрологического зондирования проанализированы эпизоды, сопровождающиеся наличием температурных инверсий. Установлено, что рассчитанные траектории радиолуча удовлетворительно согласуются с радиолокационными наблюдениями, включая случаи ложного отображения удалённых объектов. Показано, что разработанная методика позволяет корректно описывать условия возникновения сверхрефракции и может быть использована для анализа и учёта рефракции при интерпретации радиолокационных данных.

ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕФРАКЦИЮ РАДИОВОЛН И ТОЧНОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

1. Проблема учета рефракции радиоволн радиолокационных метеорологических наблюдениях

Появление радиолокаторов в 1930–х годах сыграло значительную роль не только в военных целях, но и в развитии технологий наблюдения за погодой и навигации. В настоящее время радиолокаторы активно используются для обеспечения работы сети штормооповещения. Современные метеорологические локаторы решают следующие важные практические задачи:

- идентификация опасных метеоявлений и своевременное информационное обеспечение прогноза погоды и штормовых предупреждений;
- измерение характеристик осадков радиолокационным методом и использование этих данных в последующих расчетах и прогнозах;
- обеспечение радиолокационной информацией численных моделей прогноза погоды для их инициализации и верификации [1].

Неоспоримым достоинством радиолокационных метеорологических наблюдений является уникальная возможность дистанционного зондирования облачной атмосферы на большой территории с высоким пространственным и временным разрешением. К недостаткам исследования метеоявлений в атмосфере радиолокационным методом можно отнести ослабление радиоизлучения в осадках, блокировку радиоизлучения различными помехами (например, рельефом, растительностью или постройками), снижение разрешающей способности локатора с расстоянием и, конечно, отсутствие учета погрешностей, возникающих вследствие влияния метеорологических параметров на траектории распространения радиоволн в атмосфере Земли. Большинство из

этих недостатков, кроме последнего, во многих случаях компенсируется объединением метеорологических локаторов в сеть.

Современные доплеровские метеорологические локаторы позволяют получать в режиме реального времени информацию об осадках, их местоположении и интенсивности, о зонах гроз, шквалов, высоких скоростей ветра и других опасных явлениях.

Одной из ключевых проблем радиолокации является искривление траектории электромагнитных волн средой, в которой они распространяются, т.е. атмосферой. Этот процесс носит название рефракции. Такое искривление возникает в атмосфере из-за изменения показателя преломления воздуха, величина которого является функцией температуры, давления и влажности [2]. Например, показатели преломления влажного и сухого воздуха отличаются, поэтому в районах с высокой влажностью (например, над поверхностью водоёмов) волны могут искривляться сильнее, что приводит к большим погрешностям при радиолокационном зондировании этих территорий. Это происходит из-за того, что более влажный воздух содержит больше водяного пара, чем сухой, поэтому его оптическая плотность больше, чем у сухого. Когда электромагнитная волна попадает на границу двух сред с разными показателями преломления, ее траектория изменяет направление – преломляется согласно закону Снеллиуса [3, 4].

Типы рефракции в атмосфере Земли могут быть различны, поэтому при определении координат целей с помощью метода радиолокации истинное местоположение цели определяется с погрешностями, зависящими от типа рефракции в каждом случае. Такая проблема стоит особенно остро при метеорологических радиолокационных наблюдениях.

До настоящего времени достаточно трудной задачей является идентификация потенциальной грозоопасности облака, поскольку вследствие рефракции радиоволн координаты облака (например, высота верхней границы)

неточно определяются в пространстве [5]. Данные неточности могут привести к некачественному метеорологическому прогнозу, что впоследствии может оказать деструктивное влияние на некоторые отрасли народного хозяйства.

На сегодняшний день при производстве радиолокационных наблюдений пользуются стандартной радиоатмосферой, которая предполагает, что до значения коэффициента преломления линейно зависят от высоты, при этом для средних широт градиент коэффициента составляет $-4 \cdot 10^{-8}$ 1/м [6, 7]. Однако, как известно, атмосфера Земли не является статичным объектом – в ней постоянно происходят различные процессы, влекущие за собой большую изменчивость метеорологических характеристик в разных слоях атмосферы. Многочисленные исследования показывают, что именно изменчивость метеопараметров в атмосфере приводит к различным значениям градиентов коэффициента преломления, которые ответственны за различные типы рефракции [6, 7, 8]. Разные типы рефракции, в свою очередь, по-разному влияют на траекторию распространения радиоволн, искривляя их и приводя к погрешностям в определении высоты и наклонной дальности целей. В результате, когда происходит сопоставление данных, полученных с нескольких локаторов, зоны покрытия которых перекрываются, возникают расхождения в координатах одних и тех же целей и появление ложных целей.

Для оценки погрешностей, вносимых свойствами среды распространения радиолуча в определение координат цели, проводился анализ данных о метеоявлениях, полученных с двух доплеровских метеорологических локаторов – ДМРЛ–С Валдай и ДМРЛ–С Воейково, расстояние между которыми составляет 325 км, и зоны обзора которых перекрываются [9]. Для областей, отмеченных на рисунке 1.1, были получены вертикальные сечения наблюдаемого метеобъекта, позволяющие сравнить оценки его высоты, получаемые каждым из исследуемых локаторов (рисунок 1.2). Анализ полученных сечений показал расхождения в высотах наблюдаемого явления – области с одинаковой отражаемостью имеют

неодинаковые высоты для каждого из локаторов. По данным ДМРЛ–С Валдай, исследуемое явление имеет высоту менее 5 километров, тогда как по данным ДМРЛ–С Воейково высота верхней границы явления находится выше отметки в 5 километров [9].

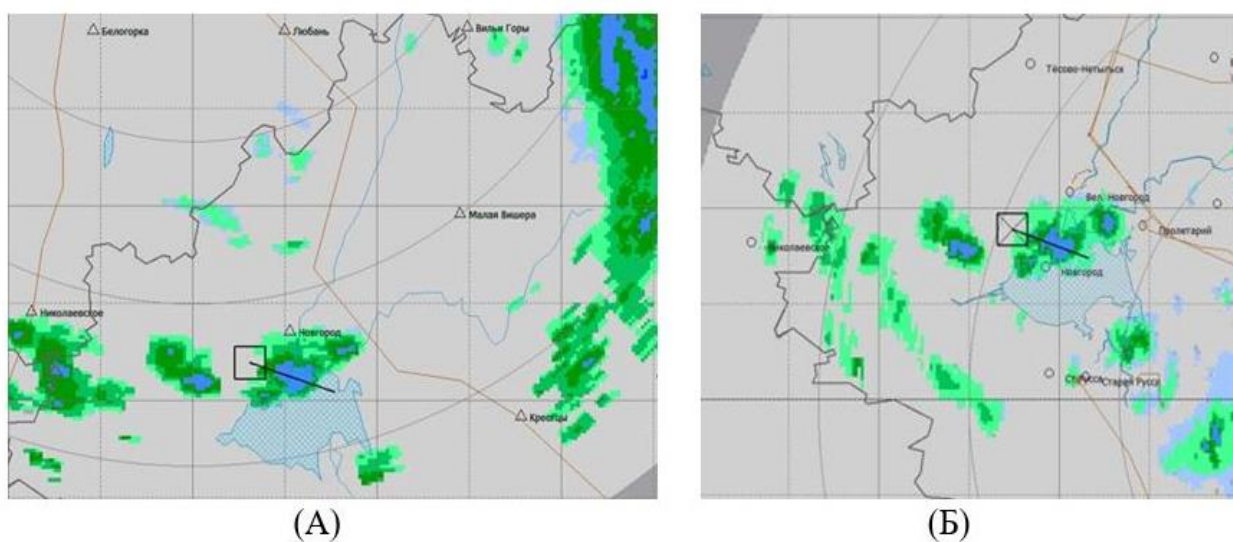


Рисунок 1.1 – Данные о метеоявлениях 19 декабря 2022 03.40 ВСВ. ДМРЛ–С Валдай (А) И ДМРЛ–С Воейково (Б) с отмеченными зонами вертикального разреза

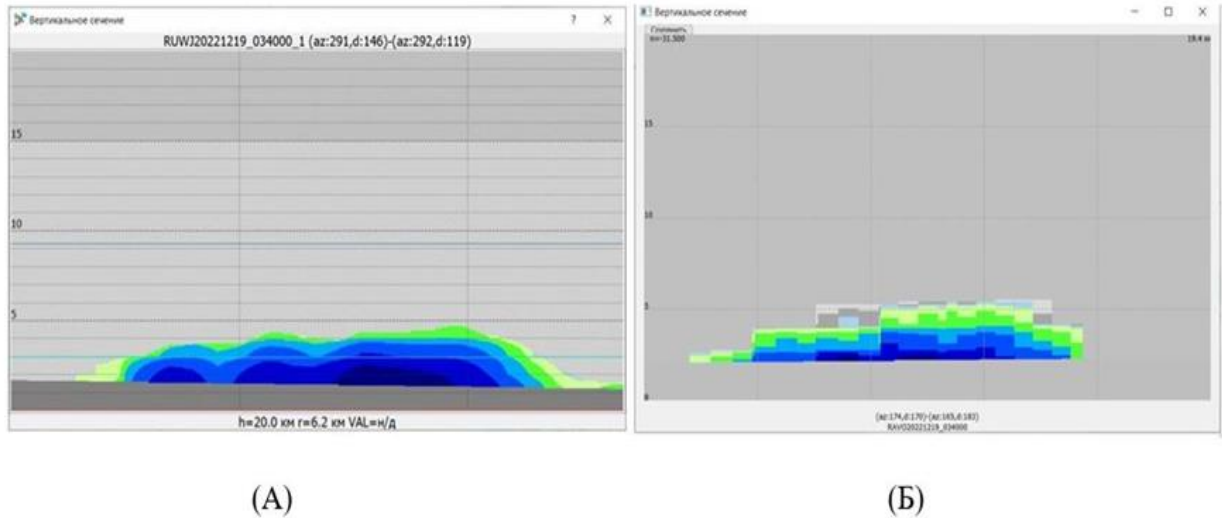
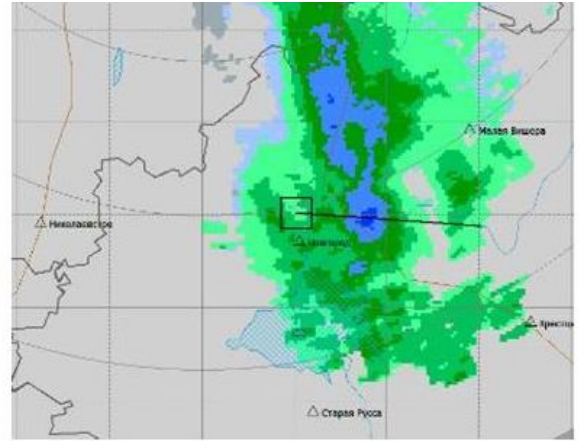


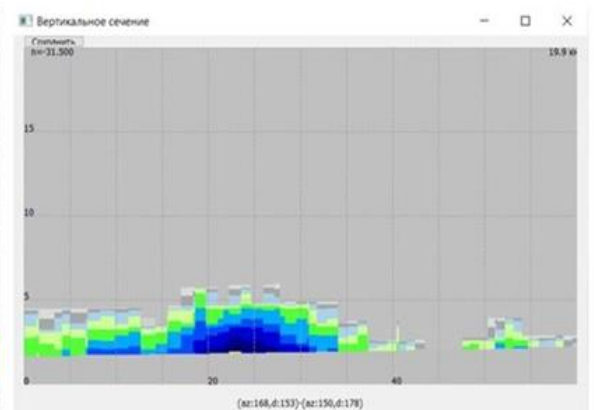
Рисунок 1.2 – Вертикальные разрезы наблюдаемой цели, полученные по данным ДМРЛ–С Валдай (А) и ДМРЛ–С Воейково (Б)

Затем были выбраны и проанализированы случаи с обратным соотношением погрешностей для исследуемых локаторов. На рисунке 1.3 представлены области интереса, а на рисунке 1.4 – вертикальные разрезы исследуемого метеоявления. Разница в определении значений верхней границы высоты объекта двумя локаторами на рисунке 1.4 также наблюдается. Однако, при сравнении с ситуацией на рисунке 1.2, можно сделать вывод о том, что для одного и того же ДМРЛ–С погрешности в определении высот целей могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, что позволяет исключить влияние ошибок горизонтирования антенн и других технических составляющих.



(Б)

разреза



(Б)

данным ДМРЛ–С Валдай (А) и ДМРЛ–С Воейково (Б)

Рассмотренные случаи позволяют с уверенностью говорить о том, что именно большая изменчивость метеорологических характеристик атмосферы порождает разные формы траектории луча радиолокаторов. Следовательно, можно сделать вывод о том, что это влияние должно быть в дальнейшем учтено для получения качественной информации об интересующих объектах. Именно поэтому учет реального распределения метеорологических параметров в атмосфере является важным для повышения точности результатов, полученных методом радиолокации.

Отсутствие учета погрешностей, описанных выше, может привести к серьезным последствиям, которые негативно скажутся на достоверности и надежности получаемых данных. Вследствие появления ложных целей и неточного определения координат метеобъектов качество метеорологического прогноза существенно снижается. Неправильные данные о местоположении объектов могут привести к аварийным ситуациям в авиации, особенно в условиях плотного трафика или при совершении сложных маневров. Ошибки в определении грозоопасности облака или высоты верхней границы уже сформировавшегося грозового облака могут угрожать безопасности воздушных судов и привести к неэффективному использованию ресурсов, таких как авиационное топливо и время.

До сегодняшнего времени грозы являются таким явлением, определение которого с помощью радиолокатора возможно только лишь путем оценки радиолокационной отражаемости. В силу определенных технических причин [10] локатор не способен зафиксировать собственное излучение молниевых разрядов, поэтому грозоопасность облака определяется только лишь по косвенным признакам, которые заключаются в оценивании того, насколько наблюдаемое облако близко к состоянию грозы.

Наиболее распространенным методом оценки грозоопасности облака является определение Y -критерия, вывод которого широко освещен в литературе [10]. Такой критерий определяется следующим выражением:

$$Y = H \lg Z_3, \quad (1)$$

где H – максимальная высота радиолокационной отражаемости; Z_3 – радиолокационная отражаемость на высоте изотермы -22°C .

Такой критерий позволяет распознавать грозу в квадрате 30×30 километров. Превышение этим критерием определённого порогового значения является маркером того, что облако грозоопасно.

Известно [11, 12], что важнейшим моментом в развитии конвективного облака является начало замерзания его вершины. С этим процессом связано интенсивное разделение электрических зарядов и превращение облака в кучево–дождевое с последующим возникновением гроз. Многочисленные экспериментальные данные [11, 12] показывают, что в таком случае температура на уровне верхней границы высоты радиоэха должна быть в диапазоне от -20°C до -25°C . То есть первым условием распознавания грозы по радиолокационным данным является превышение верхней границы радиоэха изотермы -22°C .

В конвективных облаках количество осадков в основном регулируется восходящими токами, поэтому связь радиолокационной отражаемости облака с восходящими потоками, его микрофизикой и интенсивностью выпадающих осадков позволяет в качестве второго критерия распознавания грозоопасности облака взять значения его радиолокационной отражаемости.

Метод Y -критерия имеет два серьезных недостатка. Во–первых, в данном случае используются только косвенные признаки определения грозоопасности облака. Во–вторых, в процессе определения радиолокационной отражаемости рефракция все еще считается стандартной, т.е. изменчивость метеорологических характеристик атмосферы не учитывается, что неизбежно приведет к

погрешностям в определении высоты верхней границы облака и, следовательно, к ненадежности получаемых на выходе данных. Из этого можно сделать вывод о необходимости решения задачи учета рефракции при производстве радиолокационных наблюдений, поскольку это решение позволит учесть погрешности, возникающие при изменении траектории электромагнитной волны средой ее распространения.

2. Изменчивость коэффициента преломления в атмосфере. Типы рефракции радиоволн

Пространственные свойства сферически–слоистой атмосферы определяются величиной градиента коэффициента (показателя) преломления n . Как уже было отмечено, на величину коэффициента преломления, а, следовательно, и его градиента оказывают влияние метеорологические характеристики атмосферы. Изменения величины n ведут к изменению градиентов и, как следствие, к изменению радиусов кривизны траекторий электромагнитных волн.

Коэффициент преломления радиоволн представляет собой величину, характеризующую, насколько сильно световой луч изменяет свое направление при переходе из одной среды в другую. Скорость распространения электромагнитных волн в атмосфере связана с абсолютным показателем преломления следующим соотношением:

$$n = \frac{c_0}{c}, \quad (2)$$

где c_0 – скорость радиоволн в вакууме (м/с) [6].

Показатель преломления в атмосферном воздухе близок к единице, поэтому иногда пользуются величиной $(n - 1) \cdot 10^6$, называемой индексом коэффициента преломления [6].

Величина показателя преломления атмосферного воздуха тесно связана с величиной диэлектрической проницаемости зависимостью [5, 6, 7]:

$$n = \sqrt{\eta}, \quad (3)$$

где η – диэлектрическая проницаемость (Ф/м).

Диэлектрическая проницаемость газа определяется его молекулярной массой, плотностью, абсолютной температурой и электрическими свойствами молекул. Диэлектрическая проницаемость сухого воздуха, за исключением специфических частот, на которых происходит резонанс для составляющих воздух газов, остается неизменной на протяжении всего спектра, включая световые и радиоволны. Проницаемость влажного воздуха, который состоит из комбинации сухого воздуха и молекул водяного пара, зависит от частоты электромагнитных волн. При низких частотах проницаемость может быть выше, так как молекулы воды в воздухе имеют временной лаг для реагирования на изменения электрического поля. С увеличением частоты диэлектрическая проницаемость воздуха уменьшается, поскольку молекулы не успевают следовать за быстрыми изменениями электрического поля. Иными словами, с увеличением частоты электромагнитной волны диэлектрическая проницаемость влажного воздуха снижается, что связано с динамикой поляризации молекул водяного пара – такая зависимость наблюдается вследствие полярной природы молекул воды и их дипольного момента.

В радиочастотном диапазоне молекулы не только поляризуются, но и переориентируются, следуя изменениям электрического поля [6]. В результате диэлектрическая проницаемость влажного воздуха на радиочастотах принимает более высокие значения. Значения диэлектрической проницаемости, как и значения коэффициента преломления, мало отличаются от единицы, поэтому удобно пользоваться величиной $(\eta - 1) \cdot 10^6$. Для сухого воздуха диэлектрическая проницаемость описывается следующей формулой [6, 7]:

$$(\eta - 1) \cdot 10^6 = k_1 \cdot \frac{P}{T}, \quad (4)$$

где P – давление воздуха (Гпа), T – температура воздуха (К), k_1 – постоянный коэффициент, равный 156 в диапазоне длин волн меньше 2 см.

Для водяного пара в диапазоне радиоволн диэлектрическая проницаемость может быть определена в соответствии со следующим выражением [6]:

$$(\eta - 1) \cdot 10^6 = \frac{k_1}{T} \left(\frac{k_2}{T} - \frac{e}{7} \right), \quad (5)$$

где e – парциальное давление водяного пара (гПа), k_2 – постоянный коэффициент, равный 4800.

Следовательно, диэлектрическая проницаемость влажного воздуха представляет собой величину, которую характеризует выражение:

$$(\eta - 1) \cdot 10^6 = \frac{156}{T} \left(P + \frac{4800e}{T} - \frac{e}{7} \right), \quad (6)$$

Коэффициент преломления $n = \sqrt{\eta}$ и, следовательно, $n - 1 = \frac{1}{2}(\eta - 1)$. Тогда легко можно получить выражение для определения значений коэффициента преломления воздуха, содержащего водяной пар:

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

Выражение 7 представляет собой известную формулу Фрума–Эссена, использующуюся для описания зависимости коэффициента преломления воздуха в радиодиапазоне от метеорологических параметров, таких как температура, давление и влажность. Данное выражение было впервые определено в 1906 году и с тех пор константы, входящие в него, подвергались многочисленным корректировкам, связанным с техническими улучшениями приборов, измеряющих метеорологические характеристики атмосферы. Подробный вывод

новых констант и оценка достоверности полученных результатов приводится в работах E. K. Smith, S. Weintraub [13].

Справедливость выражения 7 была подтверждена анализом многочисленных рядов вертикального распределения метеорологических величин, в ходе которого было установлено, что погрешности в определении значений коэффициента преломления во всем диапазоне длин радиоволн не превышают 0,5% [6].

Анализ формулы показывает, что с возрастанием атмосферного давления происходит увеличение значений коэффициента преломления. Это объяснимо физически, поскольку с увеличением атмосферного давления связано увеличение плотности воздуха. Следовательно, количество молекул водяного пара в единице объема тоже увеличивается. С другой стороны, если при неизменном атмосферном давлении увеличивается парциальное давление водяного пара (возрастает относительная влажность), то количество молекул водяного пара в единице объема также возрастает.

В то же время повышение температуры воздуха приводит к уменьшению значений коэффициента преломления. Это объясняется тем, что с увеличением температуры расстояние между молекулами становится больше, т.е. воздух расширяется, а, следовательно, плотность воздуха уменьшается.

Установлено [4, 5], что наибольшее влияние на изменчивость коэффициента преломления в атмосфере Земли, оказывает содержание водяного пара в воздухе, выражающееся в формуле 7 через парциальное давление водяного пара. При метеорологических измерениях в свободной атмосфере измеряется не парциальное давление водяного пара, а относительная влажность воздуха, которая потом пересчитывается в значения удельной влажности, представляющие собой количество граммов водяного пара, содержащегося в одном килограмме влажного воздуха. Принцип упомянутого пересчета широко освещен в работах Степаненко [6], Аренберга [7], Тверского [8], Григорова [14].

Логично, что погрешности определения коэффициента преломления по формуле 7 зависят от погрешностей определения основных метеорологических параметров – температуры, атмосферного давления и относительной влажности. В монографии В. Д. Степаненко [6] установлено, что абсолютная погрешность определения индекса коэффициента преломления (величины $(n - 1) \cdot 10^6$) у земной поверхности составляет 0,717. При расчете коэффициента преломления по данным о распределении метеовеличин в свободной атмосфере такие погрешности будут выше. Следовательно, для более точного определения высотных профилей коэффициента преломления необходимо повышать точность измерения метеорологических параметров. Методика такого повышения точности метеорологических измерительных приборов представлена в работах Григорова, Восканян, Никитиной [15, 16, 17].

В зависимости от изменения значений коэффициента преломления воздуха с высотой выделяют отрицательную рефракцию, отсутствие рефракции и положительную рефракцию. Положительная рефракция в свою очередь подразделяется на пониженную, нормальную, повышенную, критическую и сверхрефракцию [2, 4, 6]. В зависимости от вида вертикального распределения температуры (стратификации) в приземном слое атмосферы, происходит поднятие и расширение или опускание и сужение видимого горизонта. Следствием этого эффекта является увеличение (при расширении) или уменьшение (при сужении) геометрической дальности видимости наблюдаемых объектов [2].

Если метеорологические условия в атмосфере таковы, что коэффициент преломления n увеличивается с высотой, т.е. его градиент положительный ($\frac{dn}{dz} > 0$) и температурная стратификация атмосферы такова, что градиент температуры γ больше значения сухадиабатического градиента γ_A ($\gamma_A = 1^\circ\text{C}/100 \text{ м}$), то траектория электромагнитной волны обращена к земной поверхности выпуклой

стороной и рефракция носит название отрицательной. Такой тип рефракции может наблюдаться при чрезмерно сильном понижении температуры с высотой и повышении влажности воздуха [2, 8]. Данные условия часто возникают в дневные часы летом в степях и пустынях, при значительном прогреве поверхности земли солнечной радиацией. В умеренных широтах в дневные часы летом при значительных отрицательных температурных градиентах отрицательная рефракция наблюдается в приземном слое атмосферы до высоты в несколько метров над ровными поверхностями, например, песчаным пляжем или пустыней. При комбинации таких условий возникают нижние миражи (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Эффект «горячего асфальта» – самый распространенный нижний мираж, делающий поверхность похожей на зеркало. Является следствием отрицательной рефракции в жаркий летний день

Случай, когда градиент коэффициента преломления равен нулю $\left(\frac{dn}{dz} = 0\right)$ и температурный градиент равен сухоадиабатическому градиенту, называется отсутствием атмосферной рефракции. При таких условиях электромагнитные волны в толще атмосферы распространяются по прямолинейным траекториям.

Если градиент температуры в атмосфере меньше сухоадиабатического градиента, и градиент коэффициента преломления меньше нуля (т.е. коэффициент преломления убывает с высотой) $\left(\frac{dn}{dz} < 0\right)$, то в этом случае рефракция считается положительной, и траектория светового луча обращена к земной поверхности вогнутой стороной. В случае пониженной атмосферной рефракции значения градиента коэффициента преломления $\frac{dn}{dz} < -4 * 10^{-8} \frac{1}{м}$.

При величине градиента коэффициента преломления $\frac{dn}{dz} = -4 * 10^{-8} \frac{1}{м}$ рефракция считается нормальной. Если наблюдается сильная температурная инверсия, значения коэффициента преломления могут с высотой убывать быстрее, и тогда радиус кривизны электромагнитной волны становится равным радиусу Земли. В таком случае рефракция считается критической, и значение коэффициента преломления $\frac{dn}{dz} = -15,7 * 10^{-8} \frac{1}{м}$. При данном типе рефракции траектория распространения электромагнитной волны в атмосфере имеет постоянную высоту над поверхностью Земли, поскольку радиус кривизны волны равен кривизне Земли.

В случае наиболее мощной температурной инверсии значения коэффициента преломления могут убывать настолько быстро, что кривизна электромагнитных волн становится меньше кривизны Земли [2]. В таких условиях имеет место сверхрефракция, при которой значение градиента коэффициента преломления $\frac{dn}{dz} < -15 * 10^{-8} \frac{1}{м}$. При сверхрефракции радиоволны,

выходящие из источника, испытывают полное внутреннее отражение, затем на некотором расстоянии достигают поверхности Земли, затем снова отражаются, и цикл повторяется. Таким образом, вследствие большого числа последовательных отражений, радиоволны могут достигать целей, находящихся на значительном удалении от источника радиоволн. Траектории распространения радиолуча в атмосфере при различных типах рефракции представлены на рисунке 1.6.

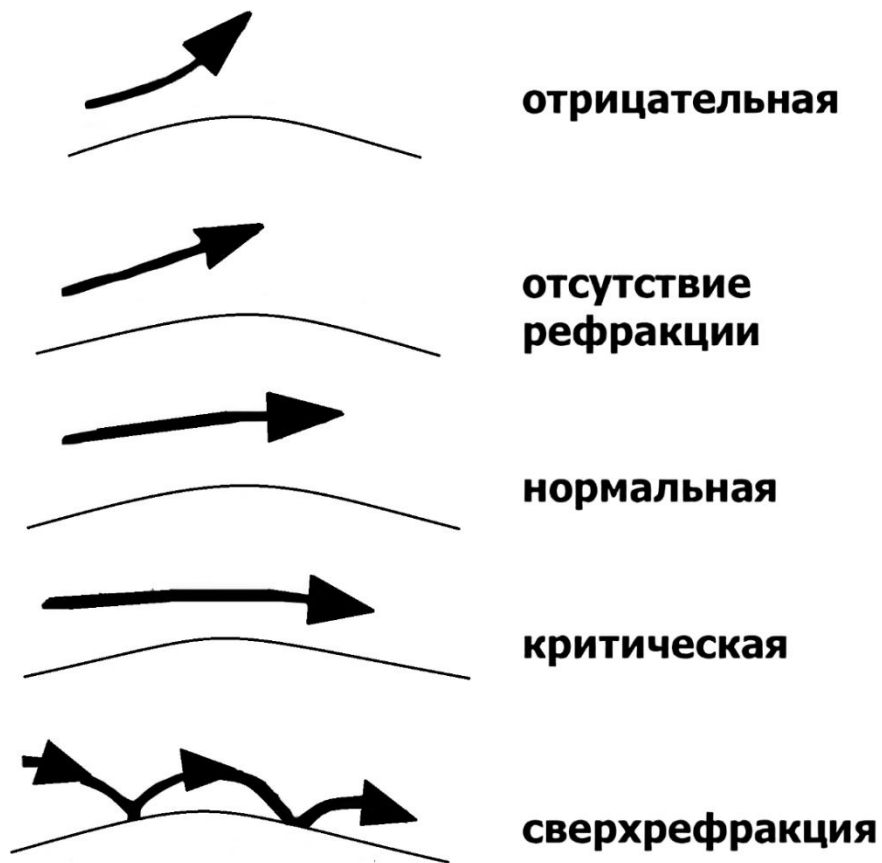


Рисунок 1.6 – Траектории распространения электромагнитных волн при различных типах рефракции

Благоприятные метеорологические условия для сверхрефракции возникают при передвижении теплых сухих масс воздуха на более холодную водную поверхность в летнее время года. В таком случае над поверхностью воды происходит сильное испарение и, при условии слабых вертикальных турбулентных потоков, наблюдается рост температуры и уменьшение парциального давления воздуха с высотой и, следовательно, уменьшение влажности воздуха.

Вторым благоприятным условием для возникновения сверхрефракции является появление приземных инверсий температуры в результате радиационного выхолаживания в утренние часы при безоблачной атмосфере. С восходом солнца усиливается испарение и происходит уменьшение влажности воздуха с высотой.

В антициклонических областях вследствие нисходящих токов воздуха при образовании температурной инверсии сжатия происходит уменьшение содержания водяного пара. В таких случаях образуются приподнятые атмосферные слои сферхрефракции, которые сливаются с приземными.

Явление сверхрефракции имеет тесную связь с синоптической обстановкой, поэтому, имея информацию о синоптической ситуации в атмосфере и характере поведения метеовеличин, можно прогнозировать её появление по метеорологическим данным.

В результате влияния явления сверхрефракции при радиолокационных наблюдениях за объектами в атмосфере могут возникать ложные цели, поскольку из-за горизонта поднимаются и становятся видимыми объекты, находящиеся далеко за радиогоризонтом. Например, при анализе карт с метеорологическими данными, полученных с доплеровского метеорологического локатора, расположенного в поселке Воейково Ленинградской области, было обнаружено, что при определенных метеоусловиях локатор фиксирует и отображает очертания

северного берега Ладожского озера (рисунок 1.7), что очевидно связано с явлением сверхрефракции.

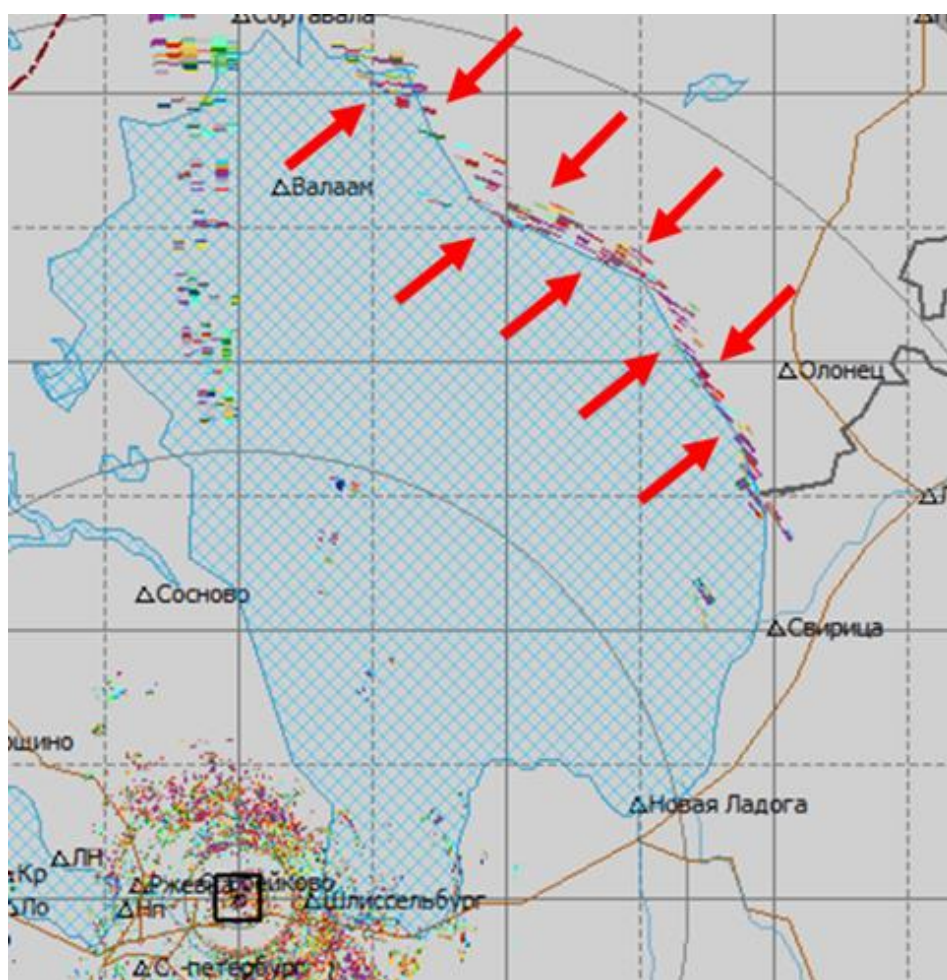


Рисунок 1.7 – Случай сверхрефракции по северо–восточному берегу Ладожского озера на карте дифференциальной отражаемости, полученный с ДМРЛ–С Воейково 10 сентября 2024

3. Исторический обзор, существующие методы учета рефракции радиоволн в метеорологии и современное состояние проблемы

Процесс рефракции с давних времен является предметом пристального интереса ученых именно потому, что она обуславливает изменения траекторий распространения электромагнитных волн в зависимости от свойств среды. Искривление траекторий распространения волн под действием рефракции приводит к отклонению наблюдаемого положения источников излучения от их истинного положения и, соответственно, к вышеупомянутым ошибкам в определении их координат [5].

Первое упоминание о рефракции можно найти в источниках, датируемых I–II веком нашей эры, под авторством Клеомена и Птолемея [18, 19, 20, 21]. В этот период исследования ограничивались только астрономической рефракцией, представляющей собой явление, при котором свет от звезд и других небесных объектов изменяет траекторию распространения при прохождении через атмосферу Земли. При астрономической рефракции излучатель находится за пределами атмосферы, на большом расстоянии от ее поверхности, а приемник на поверхности планеты или вблизи нее [8]. Учет астрономической рефракции в тот период главным образом был важен для обеспечения потребностей мореплавания и морской навигации.

В XVII веке Кеплер и Кассини впервые указали на зависимость рефракции от метеорологических характеристик атмосферного воздуха [5], и их работы стали основополагающими для дальнейших исследований атмосферной рефракции. Предположения этих ученых были основаны на том, что толща атмосферы действует как линза, проходя через которую световые лучи преломляются, что приводит к изменению видимого положения небесных объектов. За последующие два с половиной столетия были созданы

многочисленные экспериментальные таблицы для учета рефракции, включающие в себя поправки на давление, температуру и влажность воздуха у земной поверхности [20]. Идеи Кеплера и Кассини используются в современных моделях рефракции для решения ряда задач спутниковой навигации, радиолокации и метеорологических наблюдений.

Исследования земной рефракции электромагнитных волн начали развиваться в конце XIX – начале XX века. С развитием радиосвязи стало совершенно очевидно, что атмосферные условия, такие как влажность, температура и давление, влияют на распространение радиоволн.

Земная рефракция волн – это явление, при котором электромагнитные волны изменяют направление распространения при прохождении через слои атмосферы Земли. При земной рефракции приемник расположен на поверхности планеты или вблизи нее, а излучатель – на высоте, но в толще атмосферы. В некоторых источниках такой вид рефракции называют геодезической рефракцией [6].

С развитием теории электромагнитных волн, предложенной Д. К. Максвеллом в середине XIX века, началась разработка моделей, учитывающих изменение плотности воздуха и его влияние на траекторию и скорость распространения волн.

Шотландский физик Роберт Уотсон–Уотт сделал значительный вклад в развитие радиолокации, став одним из её «пионеров». Его работы [22, 23, 24] стали фундаментальными основами для последующего развития радиолокации как науки. В 1935 году Уотсон–Уотт разработал и запатентовал первый радиолокатор и с этого момента практические нужды радиосвязи и радиолокации постепенно стали требовать углубленных исследований земной рефракции. Эти исследования продолжают оставаться актуальными и сегодня, особенно в контексте современных технологий связи и метеорологии.

В России первые систематические исследования рефракции начались в XIX веке. Ученые–астрономы Ф. А. Бредихин и А. Г. Столетов проводили эксперименты, целью которых было изучение влияния рефракции на видимое положение звезд и планет. В 1930–х годах исследованиями рефракции активно занимались ученые Академии наук СССР. В это же время были разработаны более точные модели атмосферной рефракции и таблицы с поправками на влажность, давление и температуру. Эти таблицы стали стандартом для астрономических расчетов в стране.

Исследования земной рефракции в нижних слоях атмосферы имеют особое значение для метеорологии, поскольку искривление траекторий электромагнитных волн приводит к отклонению наблюдаемого местоположения метеорологических объектов в атмосфере от реального. Многолетние исследования земной рефракции, особенно над водной поверхностью, обобщены в монографии К. В. Казанского [25].

Трудности развития теории земной рефракции по сей день связаны с сильной зависимостью направления траектории распространения волн от изменчивости метеорологических параметров в атмосфере. Именно этим обусловлен тот факт, что в вопросах земной рефракции в течение долгого времени господствовала и продолжает господствовать интуитивная эмпирика [25]. Адекватный учет влияния метеорологических факторов на изменение траектории распространения волн в настоящее время представляет собой одно из основных направлений теории рефракции.

В процессе развития радиолокации как науки были предприняты шаги в направлении учета типа рефракции и его прогноза при радиолокационных наблюдениях. Существует два основных метода учета радиорефракции в атмосфере Земли: метод эквивалентного радиуса Земли и метод приведенного коэффициента преломления.

Метод эквивалентного радиуса сводит задачу криволинейного распространения волн к задаче с прямолинейным распространением в условиях реальной рефракции в атмосфере Земли [26]. Криволинейную траекторию луча при этом искусственно разгибают, изменяя математически радиус кривизны Земли до тех пор, пока траектория луча не станет прямолинейной. Полученный радиус сферы называют эквивалентным радиусом. Подробный вывод математического аппарата для определения эквивалентного радиуса Земли представлен в работе В. Н. Киселёва, А. Д. Кузнецова [26]. Понятие эквивалентного радиуса позволяет определять дальность радиовидимости, то есть дальность, где еще можно обнаружить объект, если он не находится в зоне радиотени.

Такой метод при относительной простоте обладает рядом недостатков. Во-первых, это упрощения, которые он предполагает – при использовании метода считается, что рефракция, какой бы она ни была, постоянна по всей атмосфере, а наличие слоев с разной температурой и влажностью не принимается во внимание, что в конечном итоге ведет к ошибкам. Во-вторых, в сложных метеорологических условиях, например, в ситуации шторма, данный метод не может быть применим, так как он не учитывает все факторы, в таком случае влияющие на распространение радиоволн в атмосфере. Хотя метод эквивалентного радиуса может являться полезным инструментом для учета рефракции при радиолокационных наблюдениях, его применение требует понимания существующих ограничений, что в конечном итоге снижает качество получаемой на выходе информации.

Второй метод учета рефракции электромагнитных волн в атмосфере – это метод приведенного коэффициента преломления [26], который иногда называют методом плоской Земли. Такой метод заключается в том, что влияние кривизны сферически слоистой атмосферы заменяют влиянием дополнительного значения коэффициента преломления [26]. С этой целью криволинейную траекторию луча

вместе с поверхностью Земли математически выпрямляют до тех пор, пока сферическая форма Земли не станет плоской, а луч при этом будет обладать иной кривизной, и рефракция, соответственно, будет другой. Соответствующий новой рефракции коэффициент преломления атмосферного воздуха имеет название «приведенный коэффициент преломления». Для расчета приведенного коэффициента преломления используются модели распределения вертикальных профилей метеорологических величин в атмосфере, основанные на многолетней статистической обработке массивов данных.

Данный метод является важным инструментом в области радиолокации, поскольку он позволяет более точно моделировать и предсказывать поведение радиоволн в изменяющихся атмосферных условиях. Однако, у него также имеется ряд существенных недостатков. Прежде всего, модели распределения метеорологических характеристик в атмосфере с высотой можно назвать устаревшими. Например, для моделирования высотного профиля влажности до сих пор используется формула Хргиана [8], которая была выведена в 1930 году и с тех пор не претерпевала серьезных поправок. Учитывая изменения климата за последние сто лет, подробный обзор которых освещён в работе В. А. Лобанова [27], отсутствие поправок неизбежно приведет к ошибкам в моделировании и, как следствие, к недостоверному учету рефракции таким методом. Следующим недостатком является тот факт, что параметры, используемые для расчета приведенного коэффициента, могут значительно варьироваться в зависимости от географического положения и времени года. Это делает метод еще менее универсальным и требующим постоянных поправок. И, наконец, самым весомым недостатком данного метода является неучет динамических изменений, происходящих в атмосфере. Атмосфера является динамичной средой и в некоторых случаях, особенно в сложных атмосферных условиях, изменения в распределении метеопараметров могут происходить настолько быстро, что метод

может не успевать на них реагировать, что в конечном счете неизбежно приведет к ошибкам в расчетах.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что на данный момент не существует метода, гарантированно позволявшего бы учитывать влияние распределения метеопараметров и их изменчивость, а, следовательно, и влияние рефракции на отклонение траектории радиоволн в атмосфере от их первоначального направления.

Однако, в последние десятилетия были проведены новые исследования поведения электромагнитных волн в атмосфере и представлены новые модели их распространения. Так, в 2013 году была разработана численная модель для наведения луча радиолокатора на цель с автоматическим учетом типа рефракции в атмосфере Земли. Упомянутая модель описывается в работе А. Н. Деткова, С. И. Жеребцова, А. Н. Кобузева, И. А. Макарова [28]. При построении траектории луча авторы рассматривают как стандартную атмосферу, так и возмущенную, а для учета рефракции предлагают использовать усовершенствованный метод приведенного коэффициента преломления.

В последние годы активно набирает обороты построение моделей, основанных на статистических характеристиках распределения параметров атмосферы, в том числе на распределении коэффициента преломления. В статье Ю. П. Акулиничева, А. В. Новикова [29] построена статистическая модель случайного поля индекса коэффициента преломления в слое 2–200 м над сушей. По результатам такой модели можно сделать вывод о том, что линейный ход высотного распределения коэффициента преломления (а значит и его индекса) начинается только с высоты 30 метров над уровнем моря, что позволяет исключить из дальнейших исследований слои атмосферы, расположенные ниже данной высоты. Этот факт также подтверждается исследованием суточной динамики градиента коэффициента преломления в нижнем десятиметровом слое приземной атмосферы. В работе А. С. Базаровой, А. В. Базарова, С. А. Куракова,

Е. Б. Атутова, Р. С. Сычева, Ю. Б. Башкуева, С. М. Доржиевой [30] приводится анализ характера коэффициента преломления и его градиента в приземном десятиметровом слое атмосферы в области Селенгинского среднегорья.

В статье Н. Ц. Гомбоева, А. С. Батороева [31] авторы занимаются поиском горизонтальных корреляционных связей между значениями индекса коэффициента преломления. Было установлено, что масштабы таких связей для Восточно–Сибирского региона согласуются с масштабами связей полей температуры и влажности, что подтверждает необходимость учета влияния данных метеопараметров на коэффициент преломления, а значит и на рефракцию для получения точной информации при радиозондировании атмосферы.

Таким образом, вопрос учета и прогноза рефракции в атмосфере на сегодняшний день является животрепещущим. Один из возможных путей его решения предлагается в данной работе и заключается в себе использование данных о распределении метеорологических величин, полученных с наземных метеостанций, данных аэрологического зондирования атмосферы, либо данных, полученных с использованием радиометров (о чем представлено в диссертации В. С. Косцова [32]). На основе этих данных представляется возможным оценить пространственные связи полей метеорологических величин в различных областях и с учетом этих связей разработать модель прогноза возможных типов рефракции радиоволн, которая в дальнейшем позволит учесть погрешности, возникающие при радиолокационных наблюдениях за объектами в атмосфере.

Выводы к первой главе

1. Проведённый анализ данных с двух доплеровских метеорологических локаторов (ДМРЛ–С Валдай и ДМРЛ–С Воейково) показал, что значительные расхождения в определении высот метеоявлений возникают даже при наблюдении одного и того же объекта. Поскольку погрешности изменяются по знаку и для одного и того же локатора могут быть как положительными, так и отрицательными, влияние технических факторов и ошибок горизонтирования антенны может быть исключено. Следовательно, основной причиной расхождений является изменчивость метеорологических условий и связанной с ними рефракцией;

2. Установлено, что изменчивость температуры, влажности и давления воздуха приводит к изменению коэффициента преломления и его вертикального градиента, а это напрямую влияет на кривизну траектории распространения электромагнитных волн. Рефракция является одним из ключевых факторов, определяющих точность координат объектов при радиолокационных наблюдениях, особенно в условиях сложной стратификации атмосферы;

3. Исследованные в главе случаи наблюдений подтверждают, что пренебрежение реальным распределением метеорологических величин приводит к появлению ложных целей и искажению высоты верхней границы облаков. Это может существенно снижать качество метеорологических прогнозов, а также влиять на безопасность авиации и надёжность систем штормооповещения;

4. Подчёркивается, что использование стандартной радиоатмосферы, предполагающей постоянство градиента коэффициента преломления, не позволяет корректно учитывать изменчивость атмосферы, что приводит к систематическим погрешностям в радиолокационных данных. Следовательно, возникает необходимость учитывать реальное вертикальное распределение метеорологических параметров для повышения точности измерений;

5. Проанализированы существующие методы учёта радиорефракции – метод эквивалентного радиуса Земли и метод приведённого коэффициента преломления. Показано, что оба метода содержат значимые упрощения, не учитывают динамичность атмосферы, а используемые модели расчета распределения метеопараметров устарели. Это ограничивает применимость данных методов, особенно в условиях быстро меняющихся атмосферных процессов;

6. Исторический обзор демонстрирует, что вопрос учёта рефракции остаётся актуальным на протяжении веков, однако до настоящего времени не существует модели, способной полностью и точно учитывать изменчивость метеорологических параметров и их влияние на распространение радиоволн. Это подчёркивает необходимость разработки современных методов учета и прогноза рефракции для использования в радиолокации;

7. Важность учёта распределения коэффициента преломления подтверждается также современными исследованиями, демонстрирующими наличие горизонтальных и вертикальных корреляционных связей в распределениях метеорологических величин. Эти результаты создают предпосылки для построения статистических моделей, позволяющих прогнозировать условия рефракции в конкретных регионах и учитывать их при обработке радиолокационных данных.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ И ОЦЕНКА СВЯЗАННЫХ С НЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ В РАДИОЛОКАЦИИ

1. Оценка пространственной связи коэффициентов преломления

Как уже было упомянуто в главе 1, стыковка карт, полученных с локаторов, зоны обзора которых пересекаются, происходит с потерей качества, что ведет за собой отклонения в значениях истинных координат целей. Поскольку погрешности в координатах различаются для одного и того же локатора как в большую, так и в меньшую сторону, можно сказать, что на них главным образом влияет рефракция электромагнитной волны. Учитывая этот факт, можно сделать предположение о том, что для каждого из локаторов в месте его расположения требуется отдельный учет изменчивости метеорологических параметров, а, следовательно, и распределения коэффициента преломления.

Очевидно, что разные значения градиента коэффициента преломления, а значит и разные типы рефракции по-разному влияют на распространение электромагнитной волны каждого из локаторов, поэтому можно заключить, что между полями распределения коэффициентов преломления в области установки локаторов отсутствуют корреляционные связи. Для оценки такой связи был проведен численный эксперимент, заключающийся в определении корреляции между двумя рядами значений коэффициента преломления, рассчитанных на основе данных о высотном распределении метеорологических величин, полученных по результатам аэрологического зондирования атмосферы.

Для проведения эксперимента были выбраны два радиолокатора – ДМРЛ–С Валдай и ДМРЛ–С Воейково, расстояние между которыми 325 км и зоны обзора которых перекрываются, и две аэрологические станции – Бологое и Санкт–

Петербург, расположенные вблизи выбранных локаторов (географическое расположение локаторов и аэрологических станций представлено на рисунке 2.1).

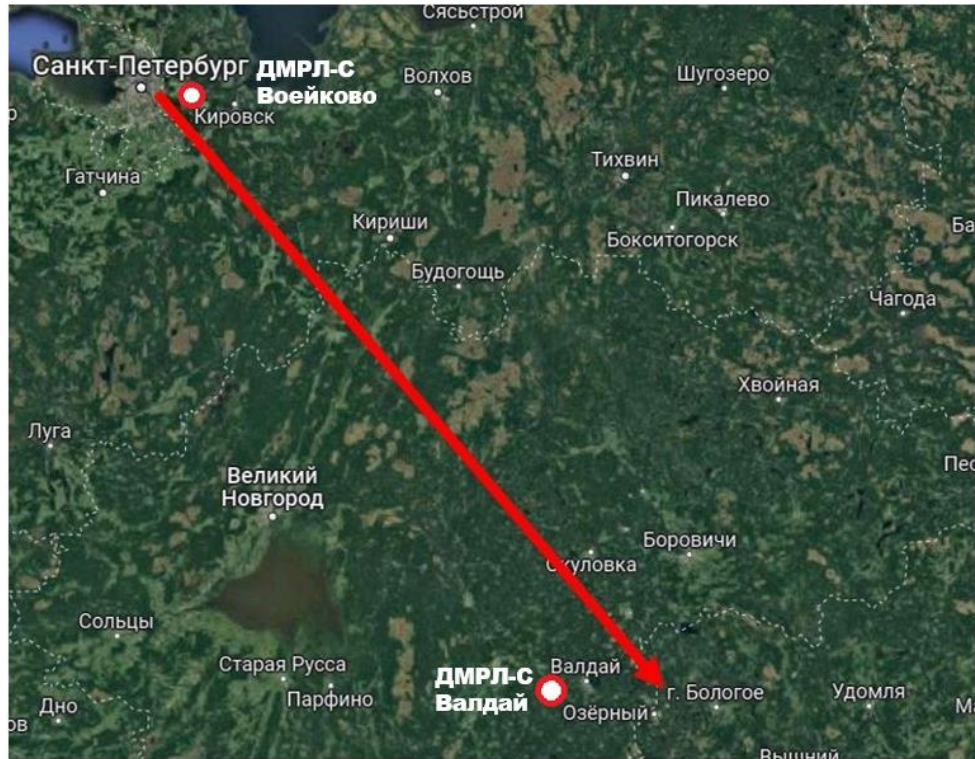


Рисунок 2.1 – Географическое расположение аэрологических станций Санкт–Петербург и Бологое, и радиолокаторов ДМРЛ–С Валдай и ДМРЛ–С Воейково

Прежде всего с упомянутых выше аэрологических станций были получены данные о высотных профилях распределения метеопараметров за летние месяцы 2022 года в сроки 00 часов и 12 часов по Всемирному координированному времени (ВСВ). Архив с данными находится в свободном доступе на сайте Вайомингского университета [33], структура выходных файлов, содержащих в себе информацию, представлена на рисунке 2.2.

Выбор данных за летний сезон для проведения эксперимента был в первую очередь продиктован преобладанием в это время устойчивой атмосферы в зоне

нахождения двух локаторов, для которых проводилось исследование. Как правило в летние месяцы синоптическая ситуация в данных областях характеризуется наличием блокирующих антициклонов, которые приносят с собой нисходящие токи воздуха, малооблачную погоду, отсутствие ветра и осадков и устойчивый характер погоды. Такие синоптические условия являются благоприятными для отсутствия резких флуктуаций в распределении метеорологических величин и, таким образом, для обнаружения возможной корреляционной связи между значениями коэффициента преломления и для чистоты проводимого расчета.

Затем, с помощью программы для ЭВМ «Вид рефракции» производился пересчет высотных профилей метеопараметров в высотные профили значений коэффициента преломления по формуле 7. В ходе первого этапа работы программы, внесенные данные о распределении метеорологических элементов (температуры, давления, влажности) приводились к регулярной сетке с шагом 100 м посредством сплайн-интерполяции. Затем по уже подготовленным данным производился расчет профилей коэффициента преломления отдельно для каждой станции и для каждого дня летних месяцев и формировалась таблица. Фрагменты результатов работы такой программы отображены на рисунках 2.3 и 2.4.

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1008.0	126	8.8	7.4	91	6.45	0	0	281.3	299.2	282.4
1004.0	158	15.6	15.6	100	11.22	10	1	288.4	319.9	290.4
1000.0	191	15.6	15.6	100	11.26	20	2	288.8	320.4	290.7
993.0	251	15.4	15.4	100	11.20	37	3	289.1	320.6	291.1
984.0	328	14.9	14.4	97	10.59	60	4	289.4	319.3	291.2
967.0	475	14.0	12.5	91	9.51	195	4	289.9	316.9	291.6
949.0	634	13.0	10.5	85	8.45	175	8	290.4	314.6	291.9
925.0	850	11.6	7.7	77	7.17	200	4	291.2	311.9	292.4
914.0	950	11.0	6.8	76	6.83	215	4	291.5	311.3	292.7
898.0	1097	10.0	5.5	74	6.35	200	12	292.0	310.5	293.1
888.0	1190	9.4	4.7	72	6.06	207	11	292.3	310.0	293.4
876.0	1302	8.7	4.1	73	5.90	215	10	292.7	309.9	293.7
859.0	1464	7.6	3.3	74	5.68	196	11	293.2	309.9	294.2
854.0	1512	7.2	2.6	73	5.45	190	12	293.2	309.3	294.2
850.0	1551	6.8	2.1	72	5.27	190	10	293.3	308.8	294.2
786.0	2188	1.4	-1.2	83	4.48	190	15	294.1	307.5	294.9
775.0	2302	1.2	-1.4	83	4.48	190	15	295.1	308.5	295.9
773.0	2323	1.1	-1.6	82	4.41	190	16	295.2	308.4	296.0
758.0	2480	0.2	-3.4	77	3.94	197	17	295.9	307.8	296.6
755.0	2512	0.4	-3.6	75	3.90	199	17	296.4	308.2	297.1
752.0	2544	0.6	-5.3	65	3.44	200	17	296.9	307.4	297.6
734.0	2739	1.6	-15.8	26	1.52	210	17	300.1	305.1	300.4
730.0	2783	1.8	-18.2	21	1.26	210	17	300.8	305.0	301.1
720.0	2894	1.6	-23.4	14	0.81	210	15	301.8	304.5	301.9
700.0	3120	0.0	-29.0	9	0.50	210	12	302.4	304.2	302.6
661.0	3564	-3.4	-30.2	11	0.47	205	14	303.6	305.2	303.7
627.0	3972	-6.6	-31.4	12	0.45	185	14	304.6	306.2	304.7
578.0	4602	-11.5	-33.1	15	0.41	220	12	306.1	307.5	306.1
548.0	5014	-14.7	-34.2	17	0.39	235	10	307.0	308.4	307.0
526.0	5331	-17.1	-35.1	19	0.37	246	13	307.6	309.0	307.7
500.0	5710	-17.7	-36.7	17	0.33	260	17	311.4	312.6	311.5
498.0	5740	-17.9	-37.9	16	0.29	260	18	311.5	312.6	311.6
476.0	6068	-20.9	-39.6	17	0.26	265	19	311.9	312.9	311.9

Рисунок 2.2 – Пример оформления данных, полученных в результате
аэрологического зондирования атмосферы

z [м]	p(z)[гПа]	e(z)[гПа]	T(z)[C]	Общее число строк =>	52	
0	1021	3.7	-5.3	Используемое число строк =>	26	
169	1000	3.4	-6.5	zmax=>	5100.000	[м]
325	980	3.2	-7.8	z [м]=>	высота над	уровнем Земли
485	960	3.1	-9.1	Шаг сетки сплайна=>	100.00	[м]
525	955	3.1	-8.9	Станция =>	Воейково	
730	930	3.4	-7.7	Месяц	День	Время
772	925	3.4	-7.7	1	1	12.000
839	917	3.2	-8.3	Сетка z-колонка А		
1157	880	2.3	-10.6	Среднее $dN(z)/dz \cdot 10^6$		
1289	865	1.9	-11.5	в тропосфере =>	-3.07	[1/м]
1360	857	1.8	-11.8	Тип рефракции=>	д: Код 2	Пониженная
1423	850	1.7	-12.1			

Рисунок 2.3 – Фрагмент результатов работы программы «Вид рефракции». Первые четыре столбца на рисунке представляют собой исходные данные о метеовеличинах

РОССИЙСКИЙ			0	318.89	-3.815
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ			100	315.08	-3.612
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ			200	311.46	-3.348
УНИВЕРСИТЕТ.			300	308.11	-3.256
			400	304.86	-3.370
Ка ф е д р а ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ			500	301.49	-3.559
ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ.			600	297.93	-3.600
			700	294.33	-3.605
Расчет профиля			800	290.73	-4.023
индекса коэффициента			900	286.70	-4.389
преломления			1000	282.31	-4.421
и его градиента.			1100	277.89	-4.128

Рисунок 2.4 – Фрагмент результатов работы программы «Вид рефракции». В первом столбце представлены высоты, к которым посредством сплайн-интерполяции были приведены данные, во втором столбце – рассчитанные в результате работы программы значения индекса коэффициента преломления, в третьем столбце – значения градиента индекса коэффициента преломления

Затем по полученным профилям значений коэффициента преломления производился расчет горизонтальной (пространственной) корреляции по формуле коэффициента корреляции Пирсона [34]:

$$R_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (8)$$

где x_i – значение величины коэффициента преломления, полученное на станции Санкт–Петербург, $\bar{x}$ – среднее арифметическое значений коэффициента преломления по данным станции Санкт–Петербург, y_i – значение величины коэффициента преломления, полученное на станции Бологое, $\bar{y}$ – среднее арифметическое значений коэффициента преломления по данным станции Бологое.

Расчет проводился для двух станций на высотах 500 м и 2000 м. Выбор нижней высоты обусловлен степенью надежности данных аэрологического зондирования, поскольку для синхронизации зонда с принимающей аппаратурой требуется время. Верхняя высота была выбрана исходя из того, что 80% водяного пара сосредоточено в 2000–метровом слое от земной поверхности и, следовательно, именно в этом слое влияние влажности на рефракцию волн максимально. По результатам расчета были получены значения коэффициентов корреляции, представленные в таблице 2. 1.

Таблица 2.1.

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

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

Из анализа можно заключить, что во всех случаях значения коэффициента корреляции не превышают 0,2, то есть можно судить об отсутствии пространственных связей между коэффициентами преломления (а, следовательно, и между метеорологическими характеристиками) на расстоянии 300 км. Это вполне обосновывает причину потери качества при стыковке карт с разных локаторов и подтверждает вывод о необходимости учета особенностей среды распространения электромагнитной волны для каждого локатора отдельно. Для того, чтобы произвести такой учет, необходимо определить, какой слой атмосферы наиболее трансформирует электромагнитную волну, иными словами, в каком слое атмосферы и при каком типе рефракции погрешности в определении координат целей достигают максимума. Далее нужно определить расстояние и высоту, где корреляционные связи между значениями коэффициентов преломления все еще сохраняются, что в дальнейшем позволит построить модель прогноза рефракции электромагнитной волны и учесть погрешности, возникающие при радиолокационных наблюдениях вследствие рефракции.

2. Оценка погрешностей, вносимых рефракцией при производстве радиолокационных наблюдений

2.1. Моделирование траектории электромагнитной волны радиолокатора в атмосфере

Учитывая неравномерное высотное распределение метеорологических характеристик в атмосфере, можно сделать вывод о том, что различные слои атмосферы по-разному будут влиять на траекторию прохождения электромагнитной волны через них. Следовательно, погрешности, вносимые разными типами рефракции в координаты исследуемой цели, будут различаться от слоя к слою. Для того, чтобы оценить вклад различных слоев атмосферы в погрешности определения координат целей методом радиолокации и определить слой, оказывающий наибольшее влияние на такие погрешности, была разработана аналитическая модель траектории движения электромагнитной волны локатора в атмосфере. За основу такой модели было взято выражение 9, представляющее собой закон преломления для сферически слоистой атмосферы [6]:

$$n * r * \sin z = \text{const}, \quad (9)$$

Где n – коэффициент преломления, r – радиус–вектор, проведенный из центра Земли в точку преломления луча, z – угол между нормалью к поверхности Земли и направлением луча.

У поверхности Земли выражение 9 принимает следующий вид:

$$n * r * \sin z = n_0 * a * \sin z_0, \quad (10)$$

где n_0 – значения коэффициента преломления у поверхности Земли, a – радиус Земли, z_0 – видимый зенитный угол прихода радиолуча от источника.

Выражение 10 позволяет построить аналитическую модель распространения радиолуча в слоях атмосферы, которая сводится к решению простейшей геометрической задачи. Основой модели послужила геометрия радиолуча, изображенная на рисунке 2.5. Далее для решения задачи атмосфера определялась в виде последовательных слоев по вертикали с шагом 100 м; в каждом из слоев коэффициент преломления предполагался равным константе. Моделируемый луч выходил из гипотетического источника (антенны), находящегося под определенным углом места, который варьировался в процессе расчета. Затем с помощью геометрических преобразований определялись углы падения и преломления радиолуча при переходе через границу двух соседних слоев с различными значениями коэффициентов преломления.

Структура такой модели позволяет рассмотреть изменения в углах падения и преломления радиолуча локатора при изменении коэффициентов преломления и их градиентов в различных слоях атмосферы. Следствием этого будет являться определение атмосферных слоев, в которых направленный луч наиболее подвержен влиянию радиорефракции, то есть тех слоев, где погрешности в определении координат целей максимальны.

Рисунок 2.5 позволяет решить простейшую геометрическую задачу, заключающуюся в определении выражений для угла преломления луча в каждом k -ом слое, проекции длины луча на поверхность Земли (горизонтальной дальности) и высоты точек перехода луча через границу двух последовательных слоев.

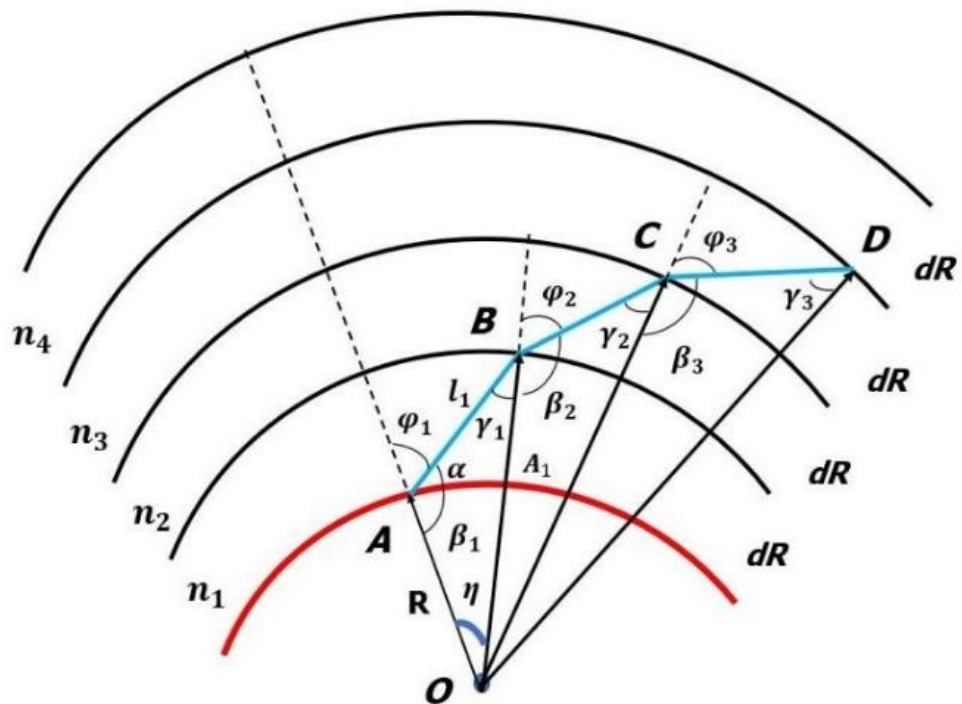


Рисунок 2.5 – Геометрическая модель радиолуча в сферически слоистой атмосфере. Здесь: α – угол места антенны; φ – угол преломления радиолуча; γ – угол падения радиолуча; l – длина луча в каждом слое атмосферы; dR – добавка к радиусу Земли R (в данном случае составляет 100 м); n – значение коэффициента 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

Закон преломления в точке B (на границе первого и второго слоев) определяется равенством двух отношений:

$$\frac{\sin \gamma_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (11)$$

Из треугольника AOB согласно теореме синусов следует, что:

$$\frac{OB}{\sin \beta_1} = \frac{OA}{\sin \gamma_1} \quad (12)$$

$$\sin \beta_1 = \sin \varphi_1 \quad (13)$$

Тогда, учитывая, выражения 12 и 13, получаем, что:

$$\frac{OB}{\sin \varphi_1} = \frac{OA}{\sin \gamma_1} \quad (14)$$

Здесь следует отметить, что величина OB включает в себя радиус Земли с прибавленной к нему добавкой, в каждом слое равной шагу по высоте, то есть:

$$OB = R + dR \quad (15)$$

Из выражений 14 и 15 следует:

$$\frac{R + dR}{\sin \varphi_1} = \frac{OA}{\sin \gamma_1} \quad (16)$$

Тогда синус угла падения на границе первого и второго слоя может быть определен в соответствии с выражением:

$$\sin \gamma_1 = \frac{R * \sin \varphi_1}{R + dR} \quad (17)$$

Значит, выражение для синуса угла преломления имеет следующий вид:

$$\sin\varphi_2 = \frac{\sin\gamma_1 n_1}{n_2} = \frac{n_1}{n_2} * \frac{R * \sin\varphi_1}{R + dR} \quad (18)$$

Для расчета длины луча АВ рассматривался треугольник АА₁В, где:

$$l_1 = \frac{dR}{\cos\varphi_1} \quad (19)$$

Проекция длины луча на поверхность Земли: АА₁ = X₁.

$$\frac{X_1}{dR} = \operatorname{ctg}(90 - \varphi_1) = \operatorname{tg}\varphi_1 \quad (20)$$

$$X_1 = dR * \operatorname{tg}\varphi_1 \quad (21)$$

С учетом выражений 20 и 21 окончательное выражение, определяющее синус угла преломления на границе первого и второго слоев, принимает вид:

$$\sin\varphi_2 = \frac{n_1}{n_2} * \frac{R * \sin\varphi_1}{R + dR} \quad (22)$$

Длина луча в этом случае:

$$l_2 = \frac{dR}{\cos\varphi_2} \quad (23)$$

Горизонтальная дальность луча (проекция наклонной дальности на поверхность Земли) будет определяться по формуле:

$$X_2 = dR * \operatorname{tg}\varphi_2 \quad (24)$$

На границе второго и третьего слоев (в точке С на рисунке 2.5) синус угла преломления может быть определен в соответствии с выражением:

$$\sin\varphi_3 = \frac{n_2}{n_3} * \frac{(R + dR) * \sin\varphi_2}{R + 2dR} \quad (25)$$

Длина луча:

$$l_2 = \frac{dR}{\cos\varphi_2} \quad (26)$$

Горизонтальная дальность луча во втором слое:

$$X_2 = dR * \operatorname{tg}\varphi_2 \quad (27)$$

С учетом очевидной закономерности, наблюдающейся в выражениях 22 – 27, можно сделать вывод, что угол преломления луча в каждом k -ом слое атмосферы описывается в соответствии со следующим выражением:

$$\sin\varphi_k = \frac{n_{k-1}}{n_k} * \frac{(R + (k-2)dR) * \sin\varphi_{k-1}}{R + (k-1)dR} \quad (28)$$

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

$$l_k = \frac{(R + (k-1)dR * \sin(\beta_k + \gamma_k))}{\sin\gamma_k} \quad (29)$$

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:

$$l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n = L = \sum_{i=1}^k l_i \quad (30)$$

Высота точек перехода луча через границу двух последовательных слоев:

$$H = k * dR, \quad (31)$$

где k – порядковый номер каждого слоя атмосферы.

Затем с помощью разработанной аналитической модели производилось построение траектории распространения электромагнитной волны, соответствующей различным типам рефракции, в том числе стандартной, которая по сей день используется при производстве радиолокационных наблюдений. Далее рассчитывались погрешности и определялся слой атмосферы, в котором влияние рефракции на траекторию волны максимально.

2.2. Расчет погрешностей и выводы о влиянии рефракции на траекторию электромагнитной волны

Поскольку в современной радиолокации в процессе наблюдений используют стандартную радиоатмосферу, в которой рефракция считается постоянной с градиентом коэффициента преломления равным $-4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, то для оценки погрешностей, возникающих при реальной рефракции, необходимо оценить разницу в координатах одной и той же цели при стандартной рефракции и других ее типах. С целью произвести такую оценку с помощью упомянутой выше модели прежде всего была построена опорная траектория распространения электромагнитной волны локатора, соответствующая стандартному типу рефракции.

Для этого первым этапом был выполнен расчет значения коэффициента преломления у земной поверхности по формуле 7 при температуре воздуха, равной 15°C (288 K), атмосферном давлении 1013 гПа и относительной влажности 40%, то есть при условиях, соответствующих стандартной радиоатмосфере [6]. Затем получившееся значение (1,009) изменялось по высоте с градиентом, соответствующим стандартной рефракции. В результате такого расчета был получен опорный высотный профиль распределения коэффициента преломления от 0 до 10 км. В дальнейшем относительно этого профиля считались погрешности координат целей в зависимости от различных типов рефракции в разных атмосферных слоях.

В процессе расчета искусственно изменялись значения углов места источника электромагнитной волны, а также было задано значение истинной наклонной дальности L гипотетической исследуемой цели, составляющее 200 км.

Путем линейной интерполяции было определено, что при стандартной рефракции и наклонной дальности 200 км при угле места 1° высота обнаружения цели H составила 5,752 км при горизонтальной дальности X равной 199,8 км.

Затем стандартная рефракция заменялась на другие типы в некоторых слоях атмосферы по следующему принципу, визуально отображенному на рисунке 2.6:

- в нижнем слое от 0 до 1500 м – изменяется тип рефракции; далее – стандартная;
- средний слой от 1600 до 3500 м – изменяется тип рефракции; выше и ниже – стандартная;
- верхний слой от 3800 до 5500 – изменяется тип рефракции; выше и ниже – стандартная.

Далее определялась высота обнаружения цели H и ее горизонтальная дальность X (проекция наклонной дальности на поверхность Земли) при фиксированном значении наклонной дальности, равном 200 км, с учетом измененного типа рефракции в выбранном слое. Затем погрешность вычислялась как разница между опорными значениями высоты и горизонтальной дальности, соответствующими стандартной рефракции, и текущими значениями. Результаты такого исследования отражены в приведенных ниже таблицах 2.2, 2.3, 2.4.

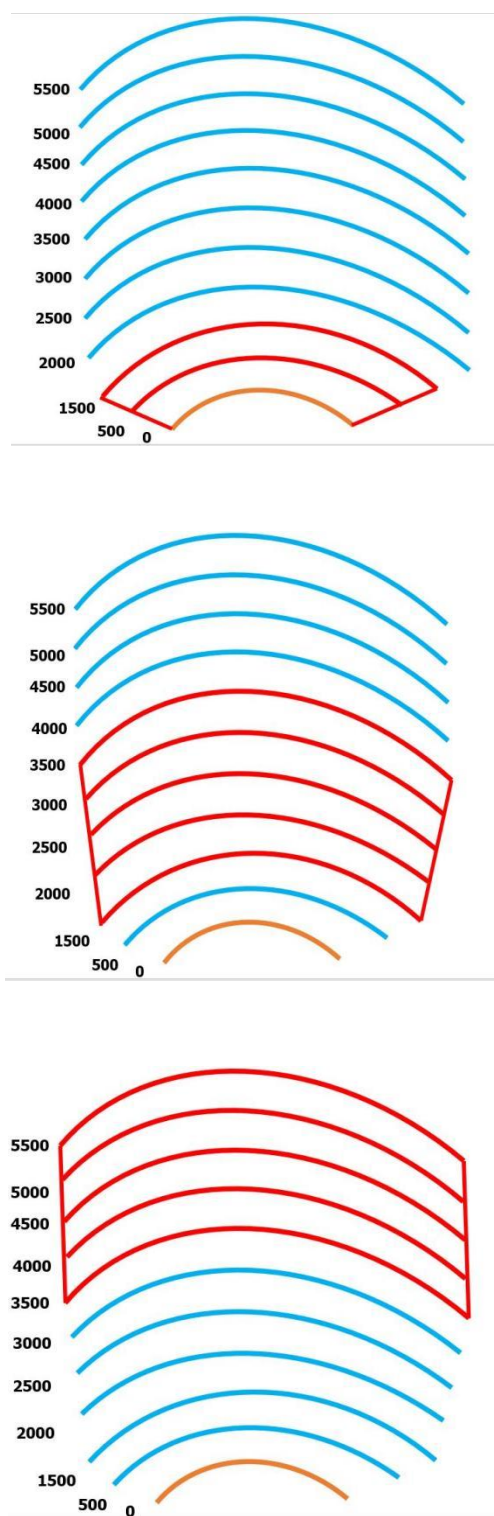


Рисунок 2.6 – Принцип замены стандартного типа рефракции на другие в сферически слоистой атмосфере. Красным выделены те слои, где стандартная рефракция изменялась на другие типы

Таблица 2.2 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	$-2 * 10^{-6}$	0–1500	5825 м	+ 274 м	0
		1600–3500	5804 м	+ 88 м	0
		3800–5500	5775	+ 2 м	0
Сверхрефракция	$-20 * 10^{-6}$	0–1500	4662 м	–	–
		1600–3500	5088 м	– 716 м	+50 м
		3800–5500	5504 м	– 11 м	+30 м
Отрицательная	$4 * 10^{-6}$	0–1500	6013 м	+ 1021 м	–30 м
		1600–3500	5950 м	+ 345 м	+100 м
		3800–5500	5844 м	+ 4 м	0

Таблица 2.3 Значения погрешностей высоты обнаружения целей и горизонтальной дальности для угла места антенны 1° (опорная высота обнаружения цели $H = 5752$ 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	$-2 * 10^{-6}$	0–1500	5825 м	+ 73 м	0
		1600–3500	5804 м	+ 52 м	0
		3800–5500	5775	+ 23 м	0
Сверхрефракция	$-20 * 10^{-6}$	0–1500	4662 м	– 1130 м	+100 м
		1600–3500	5088 м	– 664 м	+100 м
		3800–5500	5504 м	– 248 м	0
Отрицательная	$4 * 10^{-6}$	0–1500	6013 м	+ 261 м	–100 м
		1600–3500	5950 м	+ 198 м	+100 м
		3800–5500	5844 м	+ 92 м	0

Таблица 2.4 Значения погрешностей высоты обнаружения целей и горизонтальной дальности для угла места антенны 2° (опорная высота обнаружения цели $H = 9228$ 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	$-2 * 10^{-6}$	0– 1500	9250 м	+ 140 м	+ 200 м
		1600– 3500	9253 м	+ 129 м	+ 100 м
		3800– 5500	9244 м	+ 24 м	+ 200 м
Сверхрефракция	$-20 * 10^{-6}$	0– 1500	8417 м	–1269 м	+ 200 м
		1600– 3500	8130 м	–1094 м	+ 100 м
		3800– 5500	8668 м	–556 м	+ 100 м
Отрицательная	$4 * 10^{-6}$	0– 1500	9781 м	+557 м	+ 50 м
		1600– 3500	9718 м	+494 м	+ 80 м
		3800– 5500	9482 м	+258 м	+ 100 м

Полученные результаты показывают, что наибольшие значения погрешностей наблюдаются во всех случаях при изменении рефракции в нижних слоях атмосферы, причем при случае сверхрефракции они достигают максимальных значений. При всех типах рефракции значения погрешностей уменьшаются с высотой, и это говорит о том, что особое внимание при производстве радиолокационных наблюдений необходимо уделять учету ошибок, вызываемых рефракцией, в слое от 0 до 1500 м.

Также обращает на себя интерес тот факт, что при разных типах рефракции погрешности имеют разные знаки – при пониженной и отрицательной рефракции погрешность высоты гипотетической цели будет положительна, тогда как при сверхрефракции такая же погрешность будет иметь знак «минус». Это объяснимо тем, что траектория электромагнитной волны при пониженной и отрицательной рефракции проходит выше по сравнению с траекторией при стандартном типе рефракции (рисунок 2.7). При сверхрефракции же волна проходит ниже траектории волны, соответствующей стандартной рефракции (рисунок 2.8).

Особый интерес вызывают случаи, в которых погрешности при сверхрефракции не могут быть рассчитаны корректно. Например, такой случай наблюдается в таблице 2 при сверхрефракции в нижнем слое атмосферы. Погрешность в данных условиях не может быть оценена, поскольку форма луча в этом случае такова, что он упирается в землю раньше, чем достигает цели. Такие условия могут приводить к возникновению ложных целей, что в значительной степени затрудняет интерпретацию данных, полученных с радиолокатора.

Следует также отметить зависимость погрешностей от угла места антенны – при пониженной и отрицательной рефракции ошибки увеличиваются при увеличении угла места, тогда как при сверхрефракции наблюдается обратная зависимость. Максимумы погрешностей наблюдаются при малых углах места в нижних слоях атмосферы.

Погрешности по горизонтальной дальности (проекция наклонной дальности на поверхность Земли) во всех случаях не превышают 200 м, при этом четкой зависимости от высоты, типа рефракции и угла места антенны не прослеживается. Поэтому можно сделать вывод, что такими погрешностями можно пренебречь.

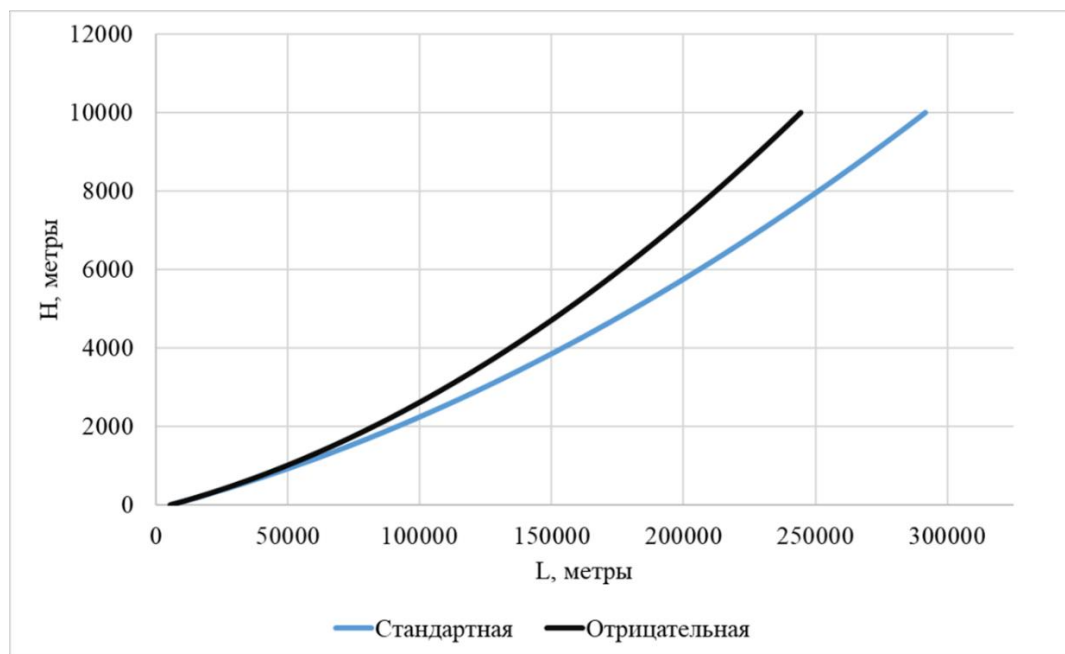


Рисунок 2.7 – Траектории электромагнитной волны при стандартном и отрицательном типе рефракции

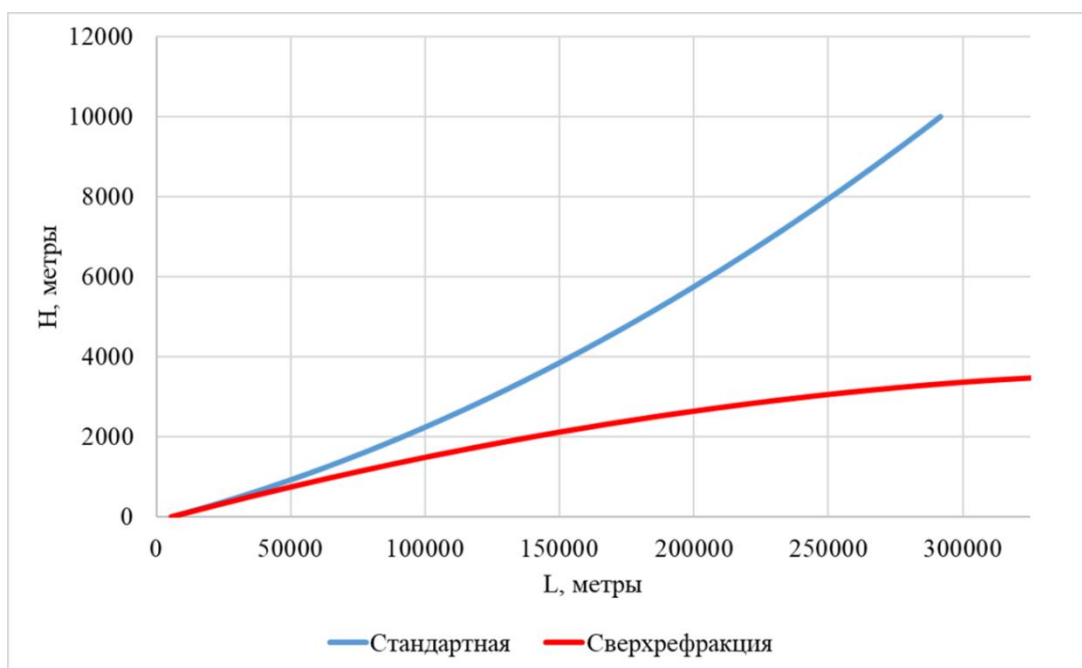


Рисунок 2.8 – Траектории электромагнитной волны при стандартной и сверхрефракции

2.3. Расчет высотного профиля коэффициента преломления с учетом стандартного распределения влажности в атмосфере

Как уже было упомянуто в главе 1, влажность оказывает наибольшее влияние на изменчивость коэффициента преломления и, как следствие, на типы рефракции в атмосфере. Однако, при производстве наблюдений до сих пор продолжают пользоваться стандартной радиоатмосферой, в которой принято линейное уменьшение температуры воздуха с высотой, равное $6,5^\circ\text{C}/\text{км}$, уменьшение давления по барометрическому закону и убывание влажности воздуха по эмпирическому соотношению, полученному А. Х. Хргианом [8]:

$$q_h = q_0 * e^{-z(b-zc)}, \quad (32)$$

Где q_0 – относительная влажность воздуха у поверхности Земли в %, z – высота, b и c – константы, определенные эмпирическим путем, зависящие от сезона.

Для оценки значений коэффициента преломления с учетом реальной изменчивости влажности и определения отличий градиента коэффициента преломления от стандартного значения был произведен расчет высотного профиля коэффициента преломления с учетом реального распределения характеристик влажности в атмосфере.

Прежде всего для этой цели был задан высотный профиль температуры, соответствующей сухой адиабате [2, 8] (при безоблачной атмосфере, температуре у поверхности Земли равной 298,15 К и относительной влажности 40 %):

$$T = T_0 - \gamma z, \quad (33)$$

где T_0 – значение температуры у поверхности Земли в К, z – высота в км, γ – градиент температуры, равный $0,6 \text{ К}/100 \text{ м}$.

Затем с учетом соответствующего высотного распределения значений температуры строился высотный профиль парциального давления по

эмпирической формуле, удовлетворительно описывающей стандартное распределение влажности в атмосфере на широте города Санкт–Петербурга [6]:

$$e = e_0 * 10^{-\frac{z}{8} - \frac{z^2}{48}}, \quad (34)$$

где e – парциальное давление водяного пара в гПа, e_0 – парциальное давление водяного пара у земли в гПа.

Далее по формуле 7 рассчитывался высотный профиль коэффициента преломления с учетом распределения влажности. Ожидалось, что при этом градиент коэффициента преломления будет постоянным и близким к значению, соответствующему стандартной рефракции. Расчет показал, что в слое от 0 до 400 м градиент остается постоянным и равным $-4 * 10^{-8} \text{ м}^{-1}$. Далее значение градиента уменьшается по модулю и к высоте 1500 м уже становится равным $-3,7 * 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, а на высоте 5000 м градиент равен $-2,8 * 10^{-8} \text{ м}^{-1}$. Подробное распределение высотного профиля градиента коэффициента преломления для рассчитанного случая представлено на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Кривая высотного профиля значений модуля градиента коэффициента преломления, соответствующая стандартному распределению влажности на широте Санкт–Петербурга

Полученное распределение значений градиента представляется логичным, если учесть, что с увеличением высоты парциальное давление водяного пара уменьшается по экспоненциальному закону [2, 8]. Отсюда можно сделать вывод о различиях в значениях градиентов коэффициента преломления в стандартной радиоатмосфере и в реальной атмосфере со стандартным распределением влажности. Такой вывод только подтверждает необходимость усовершенствования методики проведения радиолокационных наблюдений за объектами в атмосфере путем учета реальной изменчивости метеорологических характеристик.

3. Построение модели рефракции

3.1 Оценка зависимости корреляции коэффициента преломления от высоты

Отсутствие связи между значениями коэффициентов преломления для двух радиолокаторов, зоны обзора которых пересекаются, а также значительные ошибки в определении координат метеорологических объектов указывают на то, что для прогнозирования рефракции необходимо получать данные о распределении метеорологических параметров в непосредственной близости от радиолокатора. Решить эту задачу можно, измеряя необходимые параметры рядом с антенной, вычисляя на их основе коэффициент преломления и экстраполируя его значения на окружающее пространство. Для этого требуется установить зависимости коэффициента корреляции данного параметра от высоты и горизонтальной дальности с целью оценить пределы, до которых экстраполяция вообще возможна.

Для получения первой из указанных зависимостей использовалась информация о распределении метеорологических величин, полученная с аэрологической станции, расположенной в поселке Воейково. Архивы с данными находятся в свободном доступе на сайте Вайомингского университета [33].

Данные выбирались за летние месяцы 2024 года в сроки 0 и 12 часов, причем выбор летнего временного периода был так же, как и ранее продиктован преобладанием устойчивой атмосферы в летние месяцы на широте Санкт–Петербурга. Затем значения давления, температуры и влажности пересчитывались в значения коэффициента преломления по уже упомянутой ранее программе и приводились к регулярной сетке с шагом 100 м. Далее определялся коэффициент автокорреляции каждого из рядов по следующей формуле [34]:

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(n-k)\sigma^2} \dot{a}_{h=1}^{n-k} [X_h - \mu][X_{h+k} - \mu], \quad (35)$$

где $\hat{R}(k)$ – оценка автокорреляционной функции (коэффициент автокорреляции) при лаге k , k – лаг (сдвиг) – количество шагов (интервалов) временного ряда, на которое производится сдвиг, n – общее число наблюдений во временном ряду, X_h – значение временного ряда на высоте h , X_{h+k} – значение временного ряда, сдвинутое на k метров по высоте относительно h , σ – дисперсия временного ряда X_h , μ – математическое ожидание (среднее значение) временного ряда X_h .

Оценка значений автокорреляции позволит оценить высоту, до которой еще присутствует статистическая связь между значениями коэффициента преломления и, следовательно, до которой возможна экстраполяция данных.

После проведения расчета значимость коэффициентов автокорреляции проверялась по критерию стандартной ошибки автокорреляции (SE–критерию) [34]. Стандартная ошибка оценивалась в соответствии с выражением:

$$SE = \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (36)$$

где n – объем исследуемой выборки.

В случае, если коэффициент автокорреляции значим, должно выполняться следующее условие:

$$\hat{R}(k) > z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (37)$$

где $z_{\frac{\alpha}{2}}$ – критическое значение для соответствующего уровня значимости. В нашем случае для уровня значимости 5% $z_{\frac{5}{2}} = 0,96$.

В результате было установлено, что коэффициент автокорреляции рассматриваемого параметра линейно уменьшается с высотой и достигает

критического уровня 0,5 на высоте 700 м над точкой проведения измерений. Следовательно, экстраполяция значений коэффициента преломления возможна только до этой высоты. Графики изменения коэффициента автокорреляции в зависимости от высоты представлены на рисунках 2.10 – 2.12.

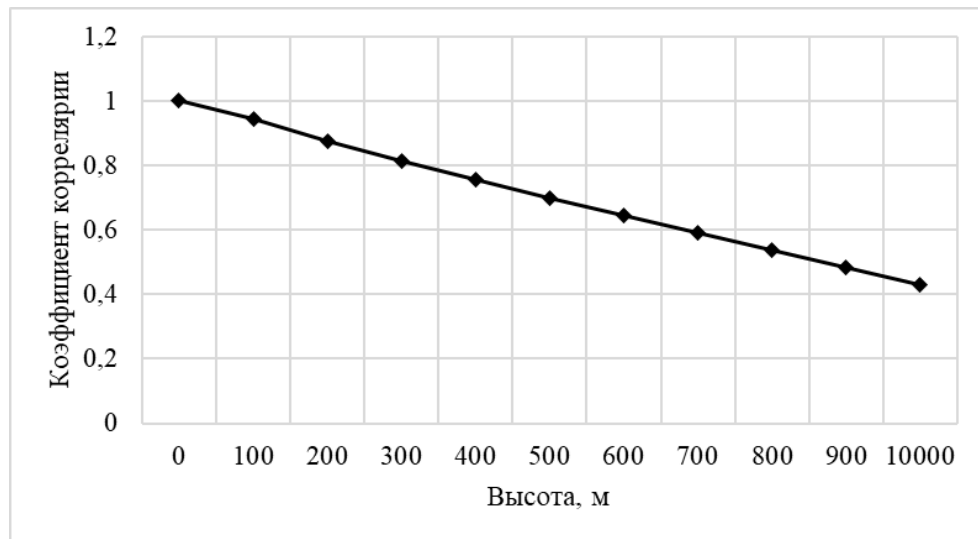


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента автокорреляции значений коэффициента преломления от высоты для июня 2024 года

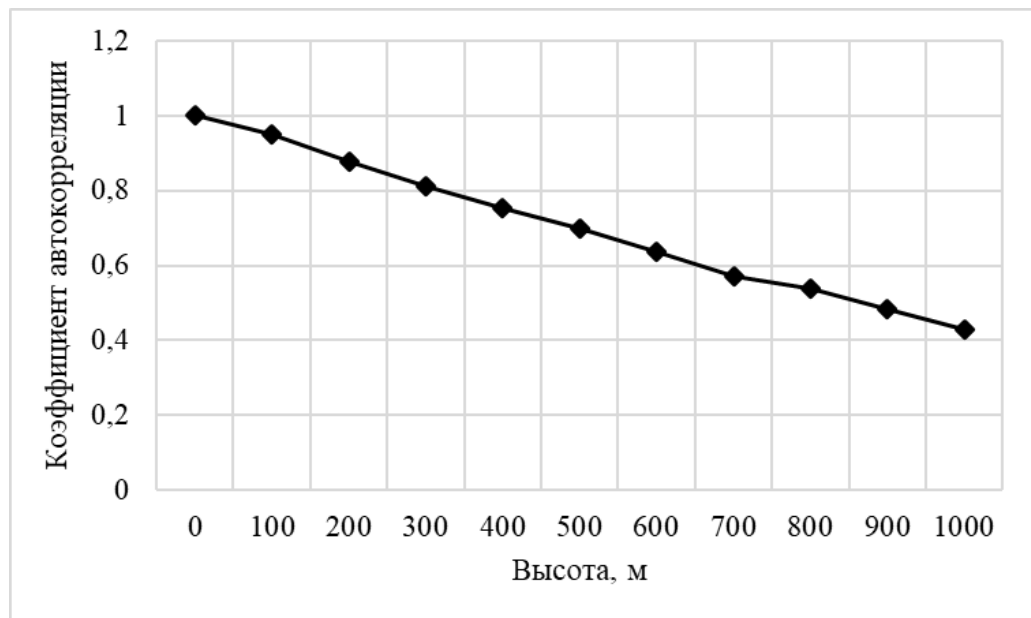


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента автокорреляции значений коэффициента преломления от высоты для июля 2024 года

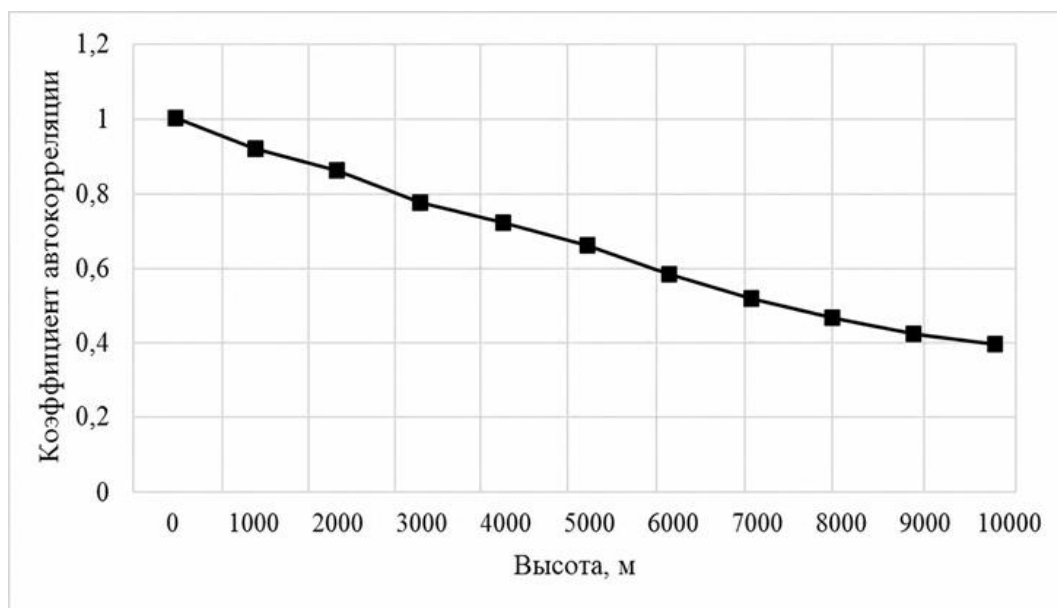


Рисунок 2.12 – Зависимость коэффициента автокорреляции значений коэффициента преломления от высоты для августа 2024 года

Поскольку ранее было доказано, что именно в нижнем слое до высоты 1500 м погрешности, вызываемые рефракцией, максимальны, встала задача повторного расчета погрешностей в определении высоты цели теперь для слоя толщиной 700 м. Результаты такого расчета представлены в таблице 2.5. Из них видно, что влияние нижнего слоя остается решающим и определяемые им погрешности почти в два раза превышают те, что обуславливаются влиянием следующего слоя. Особый интерес, как и в предыдущих расчетах представляет свехрефракция – погрешности в этом случае оценить не представляется возможным, поскольку из-за своей кривизны луч достигает земли раньше, чем цели.

Таблица 2.5. Значения погрешностей высоты обнаружения цели 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, m^{-1}	Слой, м	Высота, м	Погрешность по высоте ΔH , м	Погрешность по горизонтальной дальности ΔX , м
Пониженная	$-2 * 10^{-6}$	0–700	4516	+487	0
		700– 1400	4303	+274	0
Сверхрефракция	$-20 * 10^{-6}$	0–700	–	–	–
		700– 1400	–	–	–
Отрицательная	$4 * 10^{-6}$	0–700	5898	+1869	+20
		700– 1400	5050	+1021	+30

Из таблицы следует, что влияние на погрешности, хотя и меньшее, но все равно существенное, оказывает следующий за рассматриваемым слой атмосферы до высоты 1400 м. Учет влияния этого слоя еще более может повысить точность прогноза рефракции радиоволн, а значит и точность радиолокационных наблюдений. Однако, для этого требуется оценивать коэффициент преломления на высоте 700 м, но в настоящее время это невозможно ввиду отсутствия технических средств для подобных оперативных измерений.

3.2. Оценка радиуса корреляции коэффициента преломления

Чтобы завершить построение полной модели рефракции также необходима информация о радиусе корреляции значений коэффициента преломления в горизонтальной плоскости, в пределах которого возможна экстраполяция рефракции радиоволн. Для получения такой информации были взяты данные о распределении метеорологических величин с автоматических метеорологических станций, расположенных на высоте 3 м над поверхностью земли, за июль 2022 года. Высота была выбрана, исходя из интереса к типу рефракции и значению коэффициента корреляции в пределах приземного слоя атмосферы. Затем по уже упомянутой методике профили температуры, давления и влажности пересчитывались в профили коэффициента преломления, приводились к сетке со временным шагом 10 минут и осреднялись. В результате получались высотные профили коэффициента преломления для каждой из станций, представленных на рисунке 2.13, и между ними оценивались значения коэффициента корреляции Пирсона по формуле 8.

Проверка значимости для всех коэффициентов корреляции, полученных в данной работе, осуществлялась по широко известной в математической статистике методике с использованием t -критерия (критерия Стьюдента) [34]. В ходе проверки было установлено, что все полученные коэффициенты корреляции являются значимыми.

На рисунке 2.13 нанесены расстояния между станциями, для которых производился расчет, и коэффициенты корреляции. Анализ полученных результатов показывает, что во всех случаях, независимо от расстояния, наблюдаются высокие коэффициенты корреляции, близкие к единице. Иными словами, можно заключить, что на высоте 3 м над земной поверхностью наблюдаются высокие пространственные связи между значениями коэффициента преломления. Это также подтверждается другим исследованием

[29], из которого следует, что до высот 5 – 10 м имеет место большой градиент коэффициента преломления, что приводит к сверхрефракции, затем значение градиента уменьшается и на высоте около 30 м приближается к нулевому значению. После этой высоты начинается интересующий нас участок существенной зависимости коэффициента преломления с высотой. Следовательно, для того, чтобы прогнозировать и учитывать рефракцию, надо знать корреляционные связи значений коэффициента преломления в точках, расположенных на высоте 30 и более метров.

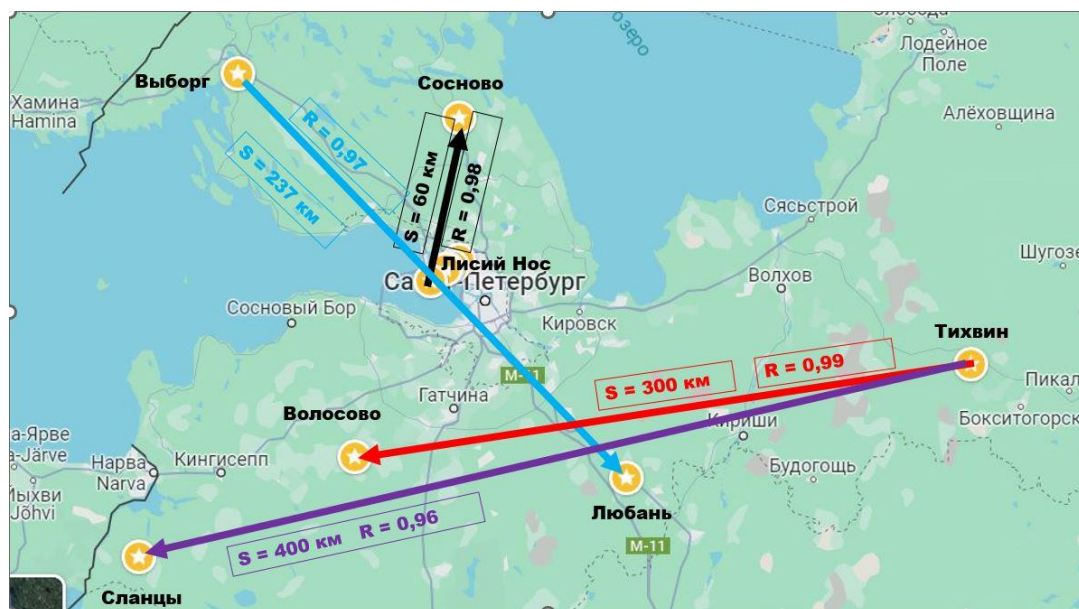


Рисунок 2.13 – Географическое расположение дорожных метеорологических станций, между которыми рассчитывались коэффициенты корреляции. S – расстояние в км, R – значение коэффициентов корреляции

Был проведен натурный эксперимент, заключающийся в определении коэффициентов корреляции между значениями коэффициента преломления, рассчитанными по данным двух удаленных друг от друга метеорологических станций.

На первом этапе были использованы станции, расположенные на крышах Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) и Военно–космической академии имени А. Ф. Можайского (ВКА им. А. Ф. Можайского).

Станция, расположенная на крыше РГГМУ представляет собой информационно–измерительную систему (ИИС) «Погода» (рисунок 2.14), выпущенную «Институтом радарной метеорологии». Система предназначена для непрерывной круглосуточной работы в автоматическом режиме с целью автоматизации процесса проведения наблюдений и обработки результатов на метеорологических станциях наблюдательной сети. ИИС «Погода» позволяет измерять температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, количество выпавших осадков [35].

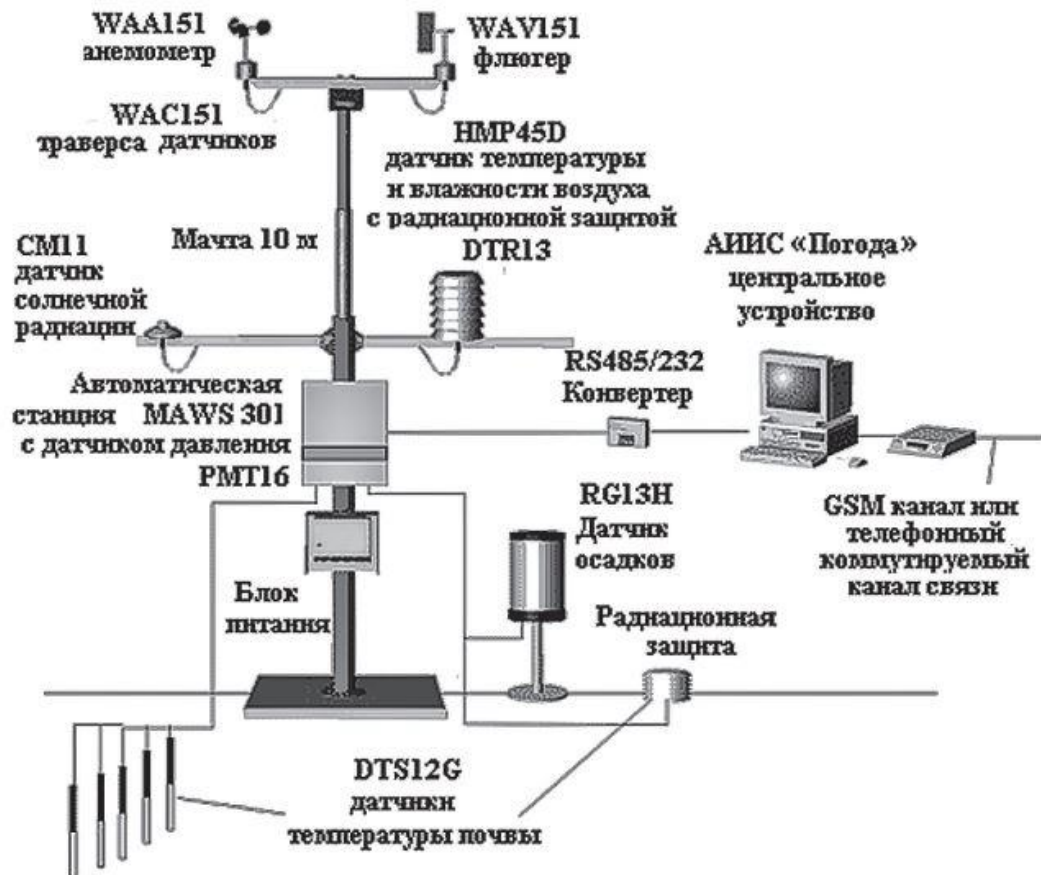


Рисунок 2.14 – Устройство информационно–измерительной системы «Погода», укомплектованной датчиками Vaisala

Станция, расположенная на крыше ВКА им. А. Ф. Можайского, представляет собой часть аэродромного метеорологического комплекса АМРИИК-3 (рисунок 2.15), предназначенную для измерений физических параметров приземного слоя воздуха: скорости и направления ветра, температуры, относительной влажности, атмосферного давления [36].

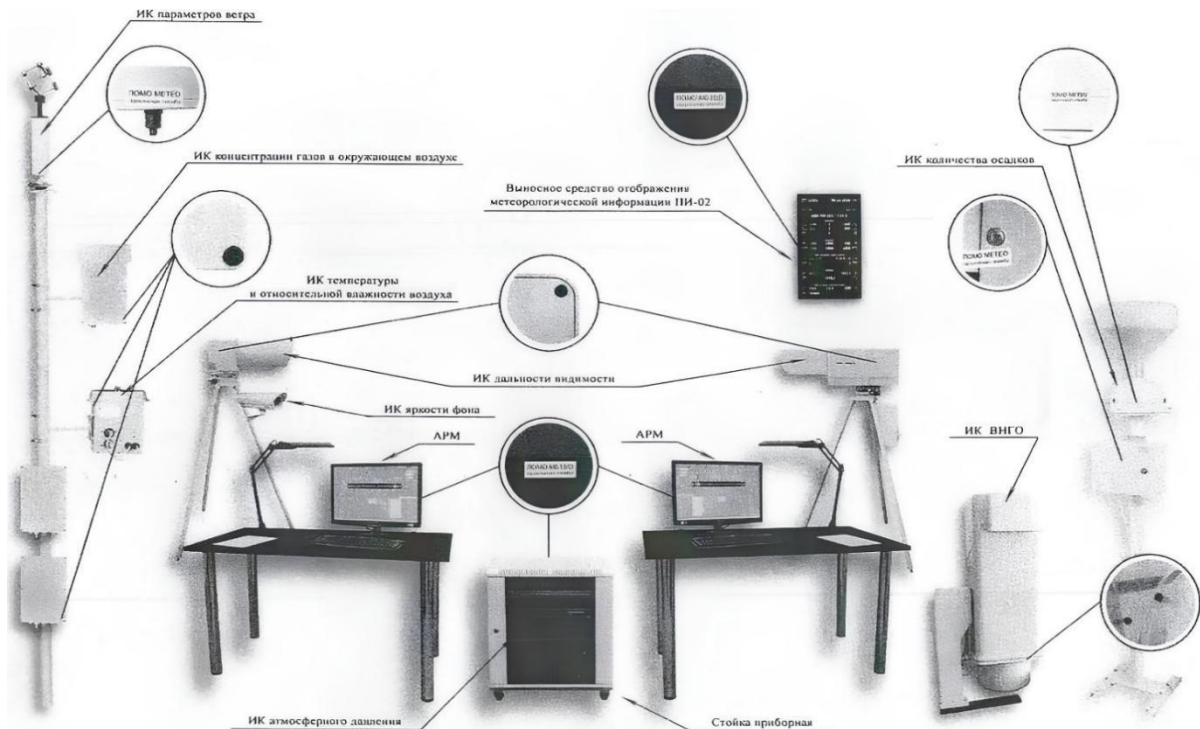


Рисунок 2.15 – Устройство метеорологического аэродромного комплекса АМРИИК-3

Расстояние между станциями составляло 8 км, и обе они находились в одинаковых физико–географических условиях – в городской застройке вблизи реки Невы, на высоте 30 м (точное географическое расположение показано на рисунке 2.16).

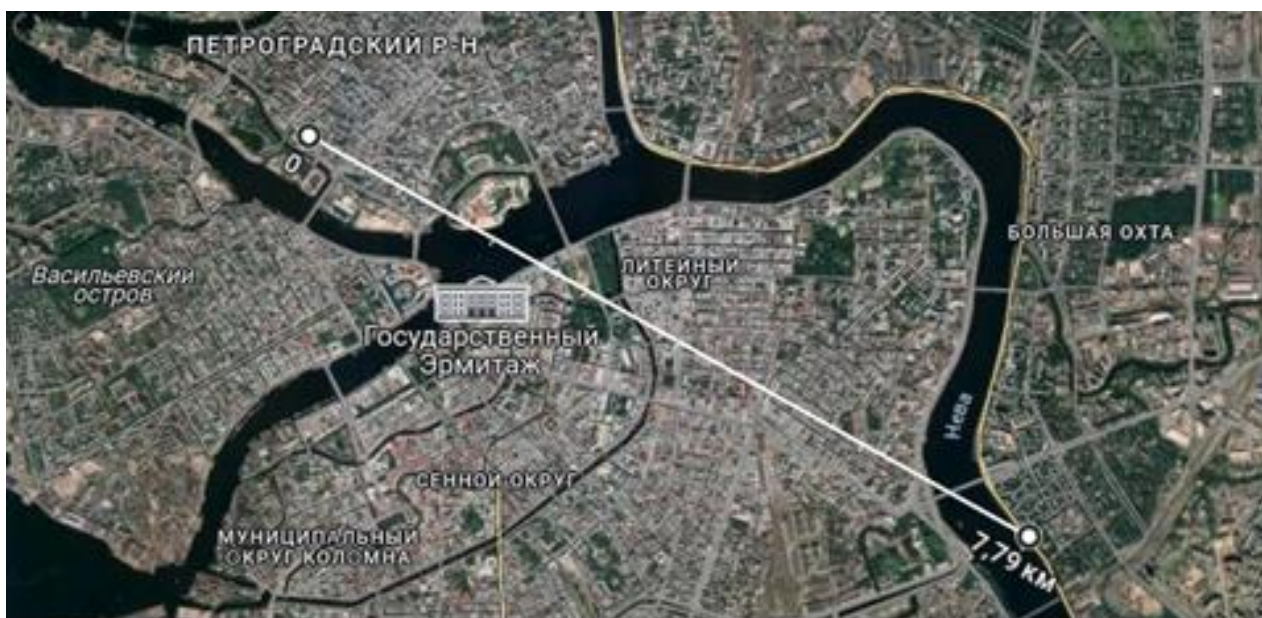


Рисунок 2.16 – Географическое расположение автоматических метеорологических станций, по данным с которых определялся горизонтальный коэффициент корреляции

По синхронно получаемым значениям метеопараметров были рассчитаны суточные профили коэффициентов преломления для каждой станции для некоторых месяцев 2023 и 2024 года с шагом 5 минут. Затем по формуле 8 определялись коэффициенты корреляции между полученными значениями. Результаты расчетов представлены в таблицах 2.6 и 2.7.

Таблица 2.6.

Значения коэффициентов корреляции, полученные для некоторых месяцев
2023 года

Месяц	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Коэффициент корреляции R	0,36	0,85	0,80	0,63	0,25	0,83	0,18	0,7	0,96

Таблица 2.7.

Значения коэффициентов корреляции, полученные для некоторых месяцев
2024 года

Месяц	01	02	03	04	05	06	07
Коэффициент корреляции R	0,99	0,19	0,15	0,25	0,75	0,84	0,82

Анализируя полученные результаты, нетрудно сделать вывод о том, что наблюдаются как месяцы с высоким коэффициентом корреляции, так и с очень малым. Такой результат можно объяснить зависимостью значения коэффициентов корреляции от степени стабильности атмосферы. В период, характеризующийся большим количеством дней с относительно устойчивой атмосферой (например, находящейся во власти устойчивого антициклона, в условиях размытого барического поля или в малоградиентном теплом секторе циклона), коэффициенты корреляции достигают высоких значений. Это связано с тем, что такая метеорологическая ситуация благоприятствует высокой пространственной связи между значениями метеопараметров и, следовательно, коэффициентов преломления, поскольку исключает большие градиенты и турбулентные перемешивания. И напротив, в случае, когда наблюдаются

большое количество дней, в течение которых атмосфера находилась в нестабильном состоянии, (например, при прохождении фронта, фронтальных или внутримассовых гроз, осадков и т.д.) наблюдаются очень малые значения коэффициентов корреляции. Это объясняется тем, что при штормовой ситуации в атмосфере наблюдаются большие градиенты метеовеличин и турбулентные потоки, которые препятствуют образованию пространственных связей между метеовеличинами, а, следовательно, и между коэффициентами преломления.

Наглядным подтверждением вышеизложенных фактов является практически линейная зависимость значений коэффициентов корреляции от количества дней, в течение которых атмосфера находилась в стабильном состоянии, представленная на рисунке 2.17.

Такие выводы подтверждают сделанное ранее предположение о том, что учет влияния рефракции на получаемые результаты возможен только в условиях устойчивой атмосферы. В противном случае, когда имеет место активное перемешивание слоев с разными характеристиками, значения рефракции могут случайным образом изменяться в зависимости от расстояния до радиолокатора и высоты слоя распространения радиоволн. Тогда рефракцию следует предполагать равной ее среднему для места установки радиолокатора значению, которое должно быть определено дополнительно.

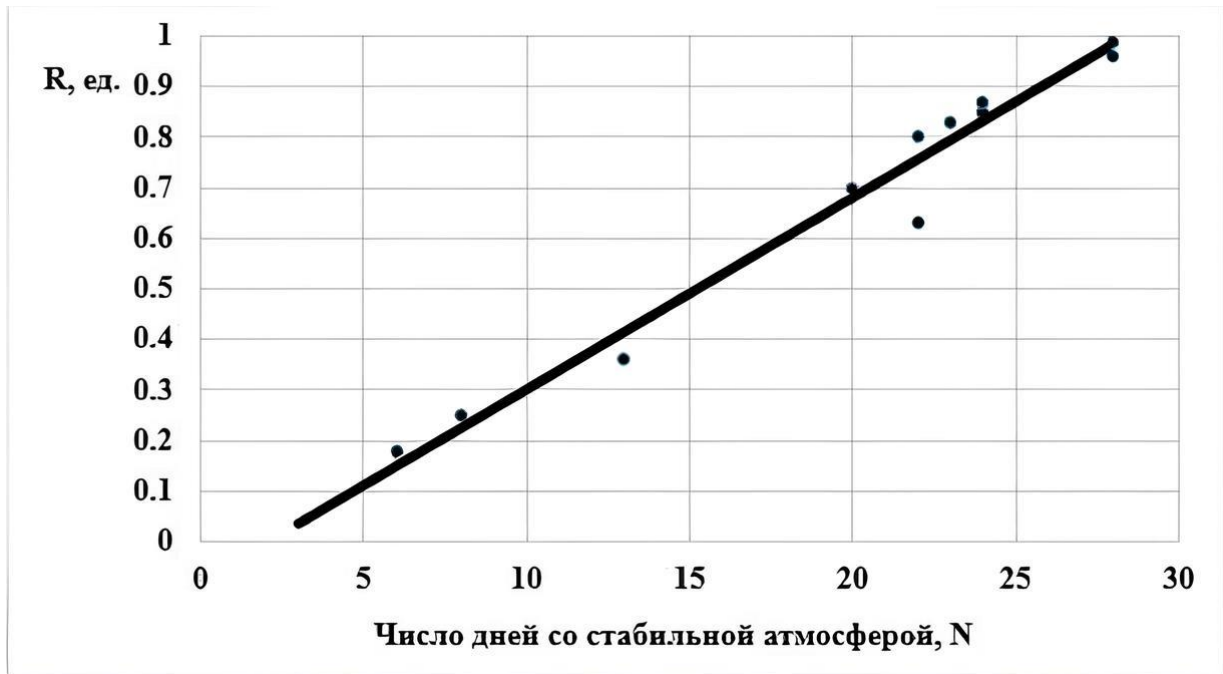


Рисунок 2.17 – График зависимости значений коэффициента корреляции от числа дней в месяце, когда атмосфера была устойчивой

Далее для определения радиуса корреляции значений коэффициента преломления расстояние, на котором рассчитывалась горизонтальная корреляция, было увеличено до 17 км посредством установки еще одной метеорологической станции на высоте 30 м на вышке радиолокатора, расположенного в поселке Воейково Ленинградской области.

Данная станция представляет собой комплекс метеорологических датчиков AMTAST AW006 (рисунок 2.18) с беспроводной передачей данных. Используется для замеров основных параметров, на которых строится прогнозирование погодных условий – влажности, температуры воздуха, атмосферного давления, уровня осадков, направления ветра и его скорости [37].



Рисунок 2.18 – Устройство метеорологической станции AMTAST AW006

Затем расчет коэффициентов корреляции повторялся по уже упомянутой ранее методике между значениями коэффициентов преломления на станции, установленной на крыше РГГМУ и на станции, установленной на крыше Главной геофизической обсерватории им А. И. Воейкова. Расчет проводился по данным для второй половины 2024 года, результаты расчета представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8.

Значения коэффициентов корреляции, полученные для некоторых месяцев 2024 года

Месяц	06	07	08	09	10	11	12
Коэффициент корреляции R	0,6	0,7	0,84	0,75	0,41	0,44	0,87

Анализ полученных результатов, показывает, что с увеличением расстояния между станциями зависимость коэффициентов корреляции от степени устойчивости атмосферы также сохраняется. При этом в месяцы, которые отличались устойчивой атмосферой, коэффициенты корреляции принимают большие значения. Однако, можно заключить, что средние значения коэффициентов корреляции для месяцев с устойчивой атмосферой убывают примерно на 0,1 каждые 10 км и, следовательно, достигают критического значения 0,5 на расстоянии 50 км, которое и является радиусом корреляции.

Таким образом, из проведенных экспериментов следует, что в условиях устойчивой атмосферы существует пространственная корреляция коэффициента преломления в пределах области размером 700 м по высоте и диаметром 100 км. При этом именно этот участок пространства в наибольшей степени влияет на искривление антенного луча. Значит, можно говорить о построении модели учета значений коэффициента преломления в этой области, а значит, и об учете типа

рефракции с целью введения дальнейших поправок в определение координат целей при производстве наблюдений. Следует также отметить, что полученные в процессе данного эксперимента количественные оценки размера области корреляции, скорее всего, действительны только в районе проведения эксперимента (Санкт–Петербург и Ленинградская область) и должны адаптироваться, как и многие параметры радиолокатора, к местным условиям.

Выводы ко второй главе

1. Пространственная корреляция коэффициента преломления на больших расстояниях отсутствует. Расчёты показали, что между значениями коэффициента преломления на расстоянии около 300 км (аэрологические станции Санкт-Петербург и Бологое) корреляция не превышает 0,2. Это означает отсутствие связей между метеорологическими параметрами в столь удалённых точках, что объясняет потерю качества при стыковке радиолокационных карт с разных локаторов;

2. Вклад различных слоёв атмосферы в погрешность координат целей неодинаков и максимален в приземном слое. Моделирование распространения электромагнитной волны показало, что именно слой от 0 до 1500 м оказывает наибольшее влияние на искривление луча и формирование погрешностей определения высоты цели. При сверхрефракции в этом слое ошибки становятся максимальными, а в ряде случаев луч достигает земной поверхности раньше, чем исследуемого объекта, что создаёт ложные цели;

3. Стандартная радиоатмосфера не описывает реальное распределение коэффициента преломления. Расчёт профиля с учётом реального распределения влажности, температуры и давления показал, что градиент коэффициента преломления существенно отличается от стандартного, причём отклонение увеличивается с высотой;

4. Автокорреляция коэффициента преломления по высоте сохраняется только до 700 м. Выявлено, что статистическая связь значений коэффициента преломления исчезает выше 700 м, что определяет физический предел вертикальной экстраполяции метеорологических данных, получаемых вблизи места расположения локатора. По горизонтали в условиях устойчивой атмосферы корреляция уменьшается примерно на 0,1 каждые 10 км и достигает 0,5 на расстоянии около 50 км. Это позволяет определить радиус корреляции ~50 км и

диаметр области ~100 км, в пределах которой рефракцию можно прогнозировать. При неустойчивой атмосфере (фронты, грозы, осадки) корреляция низкая. Размеры вертикальной и горизонтальной зон корреляции коэффициента преломления являются региональными характеристиками и должны подбираться для каждого местоположения локатора отдельно;

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ НАД СУШЕЙ И ВОДОЕМАМИ. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН

1. Оценка влияния типа подстилающей поверхности на траекторию радиоволны в атмосфере

Многочисленные данные наблюдений, в частности наблюдения с ДМРЛ–С Воейково, показывают, что на распространение электромагнитной волны также значительно влияет неоднородность подстилающей поверхности по ходу следования волны.

Следует также учесть, что в атмосфере наблюдаются два основных типа вертикального распределения метеопараметров – нормальное (стандартное) распределение температуры, давления и влажности, и инверсионное распределение, при котором профиль температуры меняет знак градиента.

При нормальном распределении температура, давление и влажность монотонно убывают с высотой. Такой тип распределения лежит в основе модели стандартной атмосферы. В нормальных условиях температура убывает в среднем на $6,5^{\circ}/1$ км, давление убывает по экспоненциальному закону, влажность уменьшается с высотой, особенно быстро над сушей.

Инверсия представляет собой отклонение от стандартного температурного градиента. Температура в инверсионном слое возрастает с высотой или остается постоянной на некотором диапазоне высот (изотермия). Температурные инверсии могут наблюдаться как у поверхности земли (приземные инверсии), так и на высоте в свободной атмосфере (приподнятые инверсии). Разность температур между нижней и верхней границами инверсий может достигать $20 - 25^{\circ}\text{C}$, что в

определенных условиях создает резкие градиенты коэффициента преломления и приводит к появлению сверхрефракции [8].

Однородная безводная подстилающая поверхность (поле, пустыня или любая другая ровная местность) создает более предсказуемые условия для распространения радиоволн. Это объясняется тем, что отсутствие водной поверхности на пути следования волны радиолокатора приводит к отсутствию значительных изменений градиентов метеопараметров. Водная же поверхность способствует резкому изменению градиентов температуры и влажности в атмосфере. В сочетании с температурными инверсиями, когда теплый воздух находится над холодным, переход подстилающей поверхности от суши к воде и обратно может создавать нестабильные условия для распространения радиоволн.

Теплый воздух, находясь над холодной водой, имеет меньшую плотность и, следовательно, более низкий показатель преломления по сравнению с холодным воздухом. Это, в свою очередь, создает градиент плотности, и слой атмосферы с таким градиентом может действовать как волновод, позволяя радиоволнам «захватываться» и распространяться на большие расстояния. Поскольку над водой всегда наблюдаются повышенные значения влажности относительно суши, это, безусловно, также приводит к изменению показателя преломления воздуха. В сочетании с температурными инверсиями это может привести к возникновению сверхрефракции над водной поверхностью.

Если наблюдается смена типа подстилающей поверхности, то есть радиоволны сначала проходят над сушей, а затем над водой, это может привести к резкому изменению их траектории. Над сушей волны могут распространяться более прямо, но при переходе в область атмосферы над водной поверхностью они, в зависимости от метеоусловий, начинают преломляться, что может привести к изменению угла падения и, как следствие, к изменению зоны обнаружения. Это важно учитывать, так как неправильная интерпретация данных приводит к ошибкам в оценке расстояний и местоположений объектов.

Учет водных поверхностей в процессе радиолокационных наблюдений критически важен, так как это позволяет более точно прогнозировать поведение радиоволн. Например, если радиолокатор настроен на работу в условиях, где присутствует переход от суши к воде, необходимо учитывать, что это может повлиять на дальность и точность обнаружения целей. Неправильная оценка этих параметров приведет к пропуску важных объектов в атмосфере при радиолокационных наблюдениях.

Вышеперечисленные особенности позволяют структурировать условия распространения радиоволн на четыре группы: над сушей при отсутствии инверсии температуры, над сушей при наличии инверсии температуры, над водой при отсутствии инверсии температуры, над водой при наличии инверсии температуры.

Таким образом, характер высотного распределения профилей метеорологических величин, а также различные типы подстилающей поверхности существенно влияют на рефракцию электромагнитных волн в атмосфере и это влияние ухудшает качество радиолокационных данных. Поэтому при производстве наблюдений необходимо учитывать возможный инверсионный ход температуры в атмосфере и наличие водоемов по ходу следования электромагнитной волны радиолокатора. Следовательно, при прогнозе и учете рефракции радиоволн также необходимо принимать во внимание особенности изменчивости коэффициента преломления, вытекающие из особенностей высотного распределения метеовеличин и особенностей подстилающей поверхности.

1.1. Анализ высотного распределения водяного пара. Влияние суши и водоемов на траекторию радиоволны при отсутствии инверсии метеопараметров

Известно, что водяной пар поступает в атмосферу в результате испарения воды с земной поверхности и распространяется в атмосфере вследствие перемешивания. В то же время максимальное содержание водяного пара ограничено его давлением насыщения, при достижении которого происходит конденсация [8]. Количество водяного пара в атмосфере значительно различается в зависимости от подстилающей поверхности – суши и водоемов. Это объясняется рядом ключевых факторов.

Водоемы являются источниками повышенного испарения воды в атмосферу. Скорость процесса испарения зависит от метеорологических условий – например, при теплой погоде, процесс испарения ускоряется. И наоборот – в холодную погоду, при низких температурах воздух часто становится более насыщенным влагой, особенно если температура воды остается выше температуры воздуха. Это приводит к уменьшению разницы между парциальным давлением водяного пара над поверхностью воды и парциальным давлением водяного пара в вышележащих слоях, что замедляет процесс испарения. Однако, во всех случаях над водоемами имеет место более высокая концентрация водяного пара, чем над сушей, где источник водяного пара ограничен содержанием влаги в почве. Поскольку над водоемами всегда более интенсивное испарение, чем над сушей, что обусловлено большими массами воды, то это увеличивает количество водяного пара в воздухе над водоемами по сравнению с сушей. Таким образом, появляется горизонтальный градиент парциального давления водяного пара.

Таким образом можно заключить, что количество водяного пара в атмосфере над водоемами значительно выше, чем над сушей, из-за более

интенсивного испарения и температурных условий. Следовательно, значения влажности в слоях атмосферы над водоемами будут существенно выше значений влажности над безводной поверхностью. Тогда справедливо предположение о том, что если по пути следования зондирующего импульса радиолокатора встречается водная поверхность, то резкие изменения влажности воздуха вблизи водоемов и над ними, возникающие по вышеописанным причинам, приведут к изменению рефракции волны. Особенно сильные проявления рефракции возникают в случаях, когда радиолуч находится на начальном участке своей траектории, что было доказано во второй главе настоящей работы.

Для учета распределения влажности при радиолокационных наблюдениях прежде всего необходимо проанализировать вертикальное распределение влажности над водоемами и над безводной подстилающей поверхностью и оценить различия в значениях. Логично, что чем больше будет разница в значениях влажности, тем более будут различаться значения коэффициента преломления над сушей и водой.

Известно, что в средних широтах парциальное давление водяного пара e с высотой z быстро убывает по закону [8]:

$$e = e_0 * 10^{-\frac{z}{\beta}} \quad (49)$$

где e – парциальное давление водяного пара на высоте z (гПа), e_0 – парциальное давление водяного пара у земной (водной) поверхности (гПа), β – коэффициент, который находят из данных наблюдений. Для нижних слоев атмосферы такой коэффициент составляет приблизительно 5000 метров (в случае, если высота z выражена в метрах).

Убывание значений парциального давления по вертикали происходит очень быстро – известно, что к высоте 1500–2000 метров значение e убывает в 2 раза, а к высоте 5000 метров – в 10 раз [8]. Удельная влажность также убывает с высотой по экспоненциальному закону. Таким образом, можно сделать вывод, что на

больших высотах воздух весьма сухой. Учитывая, что погрешности, вызываемые рефракцией вследствие влияния изменчивости влажности в атмосфере, достигают максимальных значений в приземном слое, необходимо оценить различия в вертикальном распределении парциального давления над водой и сушей именно в этом слое атмосферы.

Для оценки разницы высотного распределения влажности над сушей и водной поверхностью в первую очередь был выполнен расчет характеристик влажности при стандартном высотном распределении метеопараметров (при отсутствии инверсии температуры). Для этого давление на уровне земли задавалось равным 1013 гПа, за температуру земной поверхности была принята средняя температура почвы в Ленинградской области в теплый сезон (19°C) [39], за температуру воды – средняя температура Ладожского озера в теплый период (16°C) [40]. Далее по значениям температуры у поверхности с использованием формулы Магнуса рассчитывалось давление насыщения E над сушей и водой. Затем по значению давления насыщения определялось парциальное давление водяного пара e над каждой из поверхностей, с учетом того, что на границе вода–воздух парциальное давление всегда равно давлению насыщения [2]. При этом значение влажности над сушей задавалось равным 60%. После по формуле 3 производился расчет высотного профиля парциального давления водяного пара до высоты 1500 метров с шагом 100 метров, при этом высотный профиль температуры, необходимый для расчета, задавался с градиентом $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, что соответствует стандартной атмосфере [2]. Высотный профиль давления рассчитывался по простейшей барометрической формуле, так же описывающей распределение давления с высотой в стандартной атмосфере:

$$P(h) = P_0 * e^{-\frac{mgh}{RT}}, \quad (50)$$

где $P(h)$ – атмосферное давление на высоте h , гПа, P_0 – атмосферное давление на уровне моря (или на нулевой высоте), гПа, m – молярная масса воздуха (29 г/моль), g – ускорение свободного падения, м/с², R – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль * К), T – температура, К.

Далее по формуле Фрума–Эссена определялись значения коэффициента преломления на разных высотах отдельно для суши и для водной поверхности. Высотный ход коэффициентов преломления над водой и над сушей представлен на рисунке 3.1.

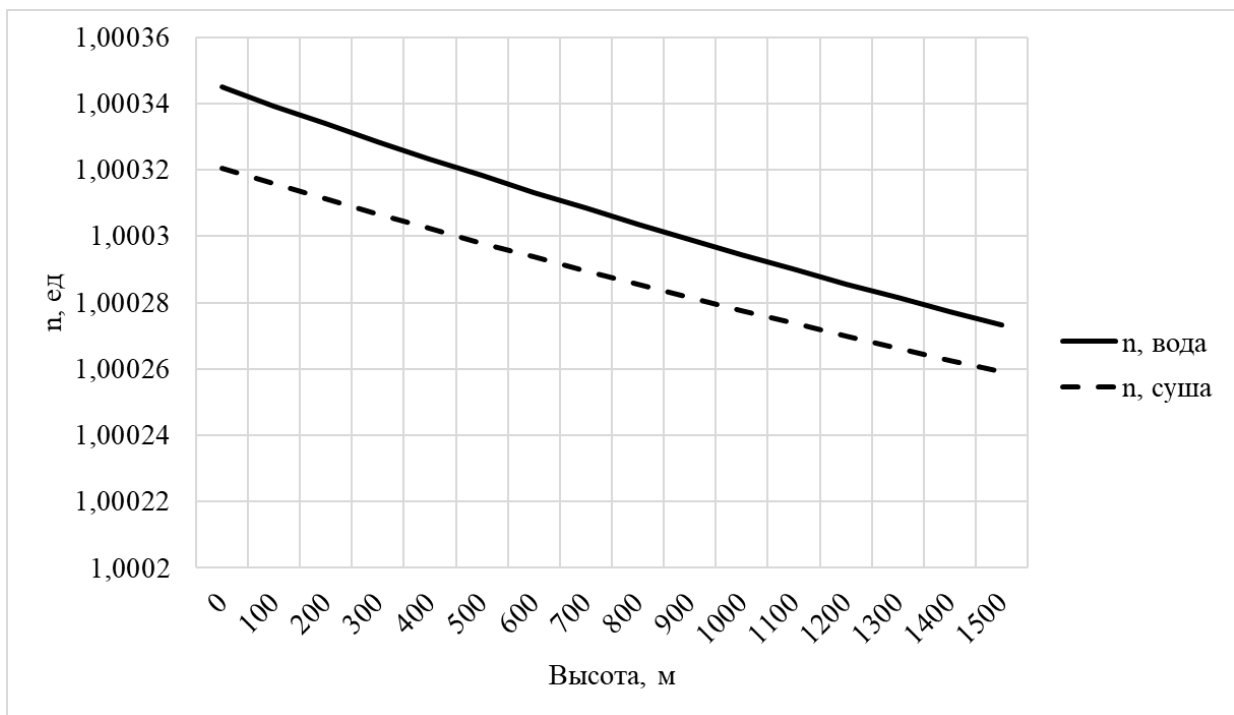


Рисунок 3.1 – Кривые высотного распределения коэффициента преломления над разными подстилающими поверхностями

Анализируя рисунок можно сказать, что в значениях коэффициента преломления над водной и безводной поверхностью существует разница, которая

с увеличением высоты уменьшается. Так, на высоте 100 метров разница составляет 24 N–единицы (одна N–единица равна разности $(1 - n) \cdot 10^6$), где n – значение коэффициента преломления), тогда как на высоте 1000 метров эта разница равна уже 17 N–единиц. Различия в значениях высотного хода коэффициента преломления над сушей и водой объясняются разницей содержания количества водяного пара – над водой количество водяного пара всегда больше, а, следовательно, и влажность выше по уже упомянутым причинам. Уменьшение разницы между значениями коэффициента преломления над сушей и водой с высотой объясняется тем, что с увеличением высоты воздух становится более сухим, поэтому в конце концов на больших высотах различия нивелируются.

Однако, наклон обеих кривых практически одинаковый, что свидетельствует об одинаковых градиентах значений коэффициента преломления над сушей и над водой. Значит, можно сделать вывод о том, что в атмосфере со стандартными высотными распределениями метеовеличин, независимо от типа подстилающей поверхности, градиент коэффициента преломления будет одинаков. Следовательно, рефракция также будет одинаковой в слоях атмосферы как над сушей, так и над водой.

Это подтверждается также кривыми траектории хода луча радиолокатора, представленными на рисунке 3.2, построенными по методике, упомянутой во второй главе, для угла места антенны 1° .

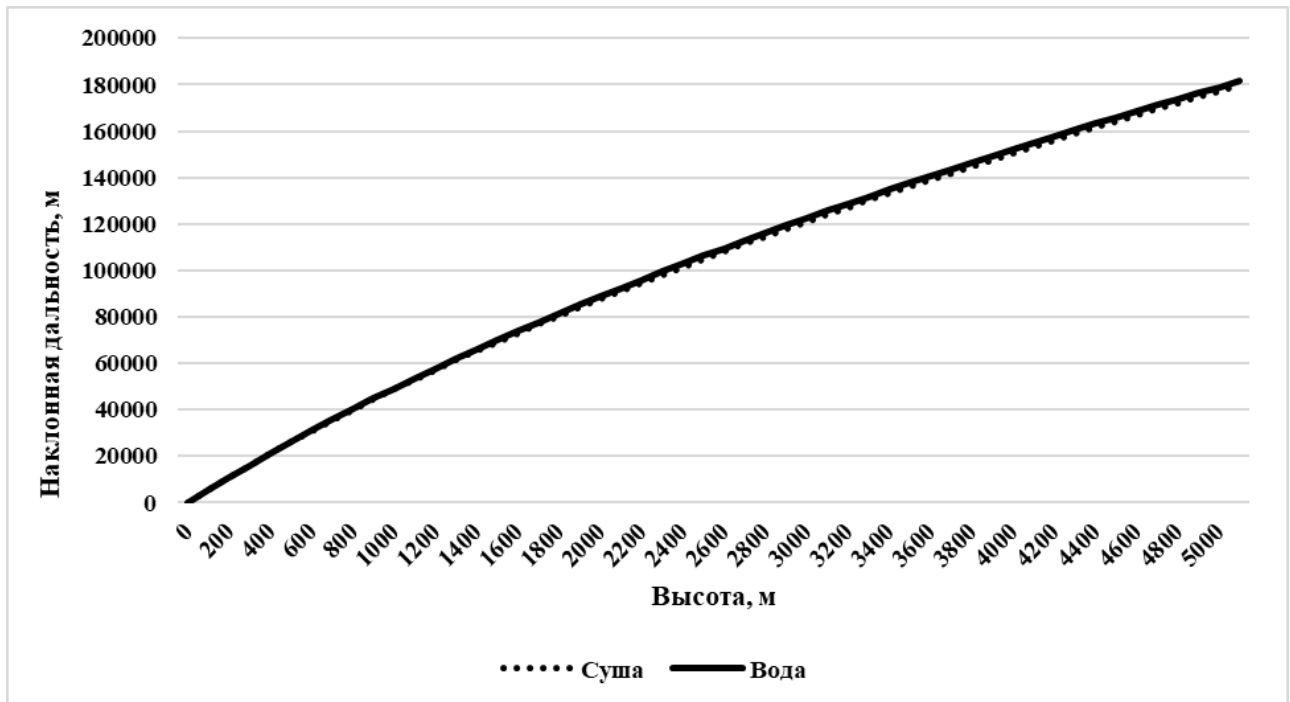


Рисунок 3.2 – Траектории луча радиолокатора над различными подстилающими поверхностями.

Из рисунка видно, что траектории распространения луча радиолокатора над водой и над сушей практически совпадают, что подтверждает предположения об одинаковых градиентах коэффициента преломления в стандартной атмосфере вне зависимости от типа подстилающей поверхности.

Однако, при реальных радиолокационных наблюдениях обычно наблюдается смена типов подстилающей поверхности, поскольку электромагнитная волна преодолевает большие расстояния. Значит, для оценки влияния водных поверхностей на траекторию волны радиолокатора, необходимо проанализировать случаи перемены суши на водоем прежде всего при стандартных условиях. С этой целью по методике, подробно описанной в главе 2, был произведен расчет погрешностей высоты обнаружения гипотетической цели при сменах разных типов подстилающей поверхности.

Прежде всего было задано значение наклонной дальности цели, равное 100 000 метров, затем для угла места антенны 1° и начальных условий $t_0 = 19^\circ\text{C}$, $P = 1013$ гПа, $E = 19,12$ гПа определялась опорная высота обнаружения цели, которая составила 2232 м. Высотный профиль коэффициента преломления в данном случае рассчитывался исходя из предположения, что подстилающая поверхность (суша) безводна, т.е. значения влажности не претерпевают резких изменений на протяжении всего хода следования электромагнитной волны.

Далее моделировалась смена подстилающей поверхности с суши на воду при вышеописанных начальных условиях и определялась новая высота обнаружения цели. Перемена типа подстилающей поверхности моделировалась как изменение профиля коэффициента преломления начиная с высоты, соответствующей дальности, с которой начинается иной тип подстилающей поверхности, с учетом того, что над водными поверхностями на границе раздела сред вода–воздух относительная влажность всегда равна 100% и парциальное давление равно давлению насыщения.

Затем рассчитывалась погрешность в определении высоты цели, вносимая изменчивостью влажности вследствие перемены подстилающей поверхности с безводной на водную. Погрешность определялась как разница между фактическим значением высоты обнаружения цели и опорным значением, упомянутым выше. В процессе расчета варьировалось расстояние от места установки радиолокатора до границы, на которой происходит смена двух сред. Результаты расчета погрешностей представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Значения погрешностей высоты обнаружения цели с учетом перемены подстилающей поверхности (опорная высота обнаружения цели $H = 2232$ м).

Протяженность участка S, м над сушей – над водой	Высота обнаружения цели H, м	Погрешность высоты обнаружения цели, ΔH, м
10 000 – 130 000	2323	91
20 000 – 130 000	2304	72
30 000 – 130 000	2289	57
50 000 – 130 000	2267	35

Из таблицы следует, что в целом погрешности в определении высоты цели не превышают даже 100 метров. Это объясняется практически идентичными кривыми траектории распространения электромагнитной волны над сушей и водой при стандартных распределениях метеорологических величин. Также это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что при таких условиях влияние подстилающей поверхности на рефракцию волн и, следовательно, на погрешности в координатах цели, настолько минимально, что им можно пренебречь.

Однако, это также означает необходимость исследования влияния разной подстилающей поверхности на рефракцию при нестандартных условиях в атмосфере – например, при нестандартных высотных распределениях температуры (инверсии) и влажности воздуха в некоторых слоях атмосферы. Такие слои могут действовать как волноводы, отражая радиоволны обратно к земле и тем самым вызывая ошибки в координатах целей.

Также из таблицы можно сделать вывод, что погрешности максимальны при минимальном расстоянии от места установки локатора до границы раздела двух сред. Это объяснимо, поскольку чем ближе находится водная поверхность к точке расположения локатора, тем в более низких слоях атмосферы оказывается направленный луч при прохождении над водой. Во второй главе было доказано, что именно нижние слои атмосферы оказывают самое значительное влияние на искривления траектории луча. Значит, можно предположить, что при реальных условиях, отличных от стандартных, наличие водной поверхности по пути следования усугубит это влияние.

Здесь важно отметить, что решающую роль в наличии или отсутствии больших погрешностей играет расстояние, на котором находится водный объект относительно места установки локатора. Поскольку погрешности максимальны в нижних слоях атмосферы, значит, ошибки, вносимые иным распределением влажности над водной поверхностью, будут максимальны только в случае близкого расположения водного объекта относительно локатора. Это объясняется тем, что в этом случае луч достигает водной поверхности, ещё находясь в нижних слоях атмосферы, где количество водяного пара, влияющего на коэффициент преломления, максимально. В случае отдаленного расположения водной поверхности относительно места установки локатора луч, достигая слоев атмосферы над водной поверхностью, будет находиться высоко, в той области, где концентрация водяного пара выравнивается с его концентрацией над сушей. Поэтому в таком случае погрешности в определении координат целей будут незначительные.

2. Метод прогнозирования рефракции радиоволн

Согласно проведенному исследованию, в условиях устойчивой атмосферы существует пространственная корреляция коэффициента преломления в пределах области 700 м по высоте и диаметром 100 км. Во второй главе настоящей работы установлено, что именно на этом участке пространства происходит наибольшая трансформация антенного луча в результате различных типов рефракции. Основываясь на сделанных выводах, можно предложить следующий метод прогноза рефракции радиоволн.

Прежде всего на высоте расположения антенны радиолокатора (30 м над поверхностью земли) необходимо установить датчики измерения метеорологических параметров – температуры, давления и влажности. Расположение датчиков не должно вызывать особых трудностей, поскольку такая высота является стандартной для вышек метеорологических локаторов.

Затем по результатам измерений значения относительной влажности воздуха пересчитываются в парциальное давление водяного пара. Далее с использованием формулы Фрума–Эссена (формула 7) рассчитывается значение коэффициента преломления на высоте установки радиолокатора и производится его экстраполяция в соответствии с формулой [34]:

$$n(h) = \mu_n(h) + \hat{R}(h) \frac{\sigma_h}{\sigma_0} (\mu_{n0} - \tilde{n}_0), \quad (51)$$

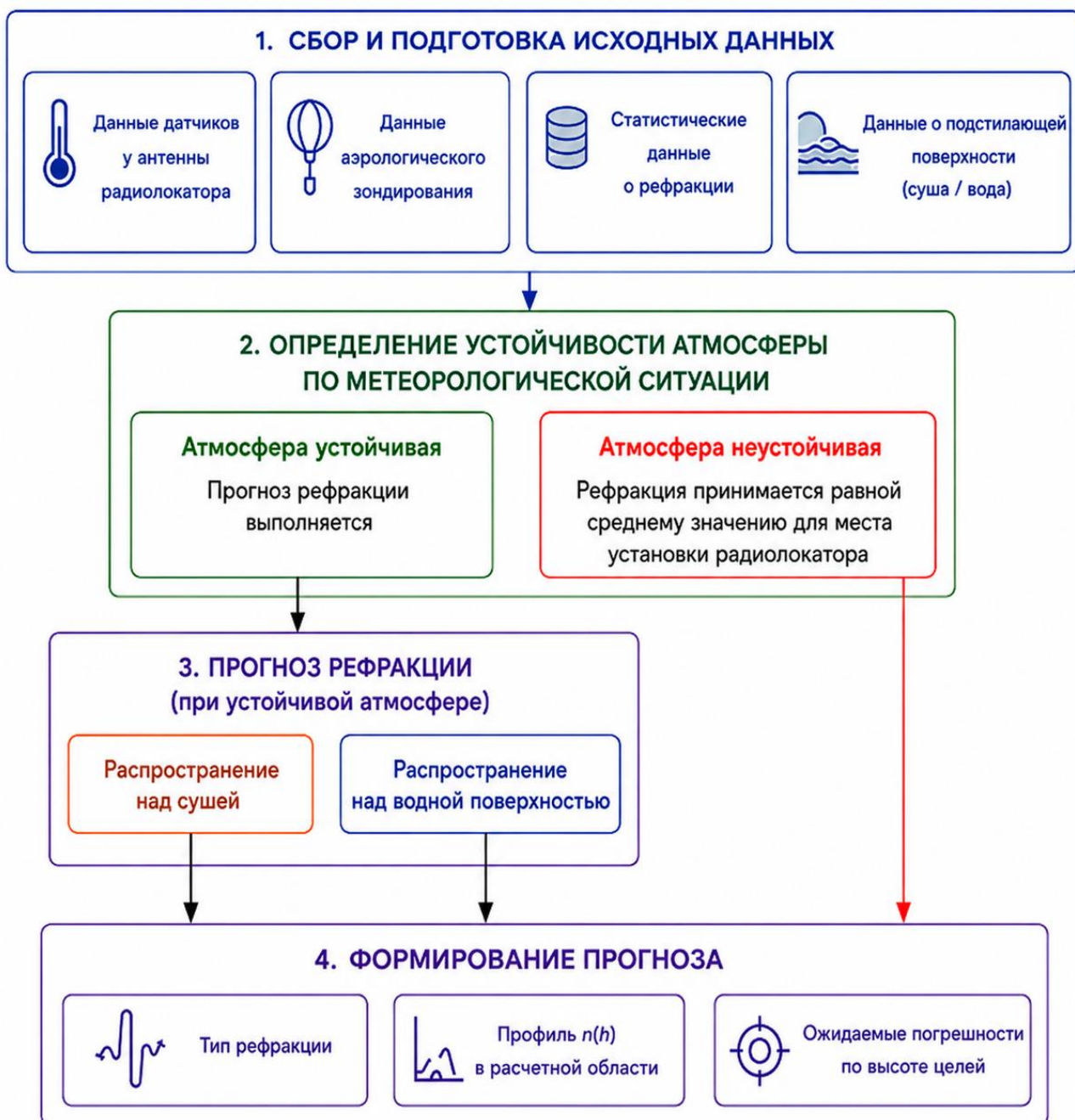
где $n(h)$ – расчетное значение коэффициента преломления на высоте h над антенной, μ_{n0} и $\mu_n(h)$ – математическое ожидание коэффициента преломления на высоте антенны и на высоте h соответственно, $\hat{R}$ – коэффициент автокорреляции коэффициента преломления на высоте h , σ_{n0} и $\sigma_n(h)$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

Дисперсия оценок определяется в соответствии со следующим выражением:

$$D(h) = \sigma_h^2(1 - R^2(h)) \quad (52)$$

В предположении того, что полученный профиль коэффициента преломления постоянен на расстоянии 50 км от антенны и его соответствия зависимости $\mu_n(h)$ на больших расстояниях, экстраполируется градиент коэффициента преломления и тип рефракции, получают погрешности к оценкам высоты целей на разном расстоянии от антенны.

Разработанный метод наглядно иллюстрирует блок–схема, представленная на рисунке 3.3.



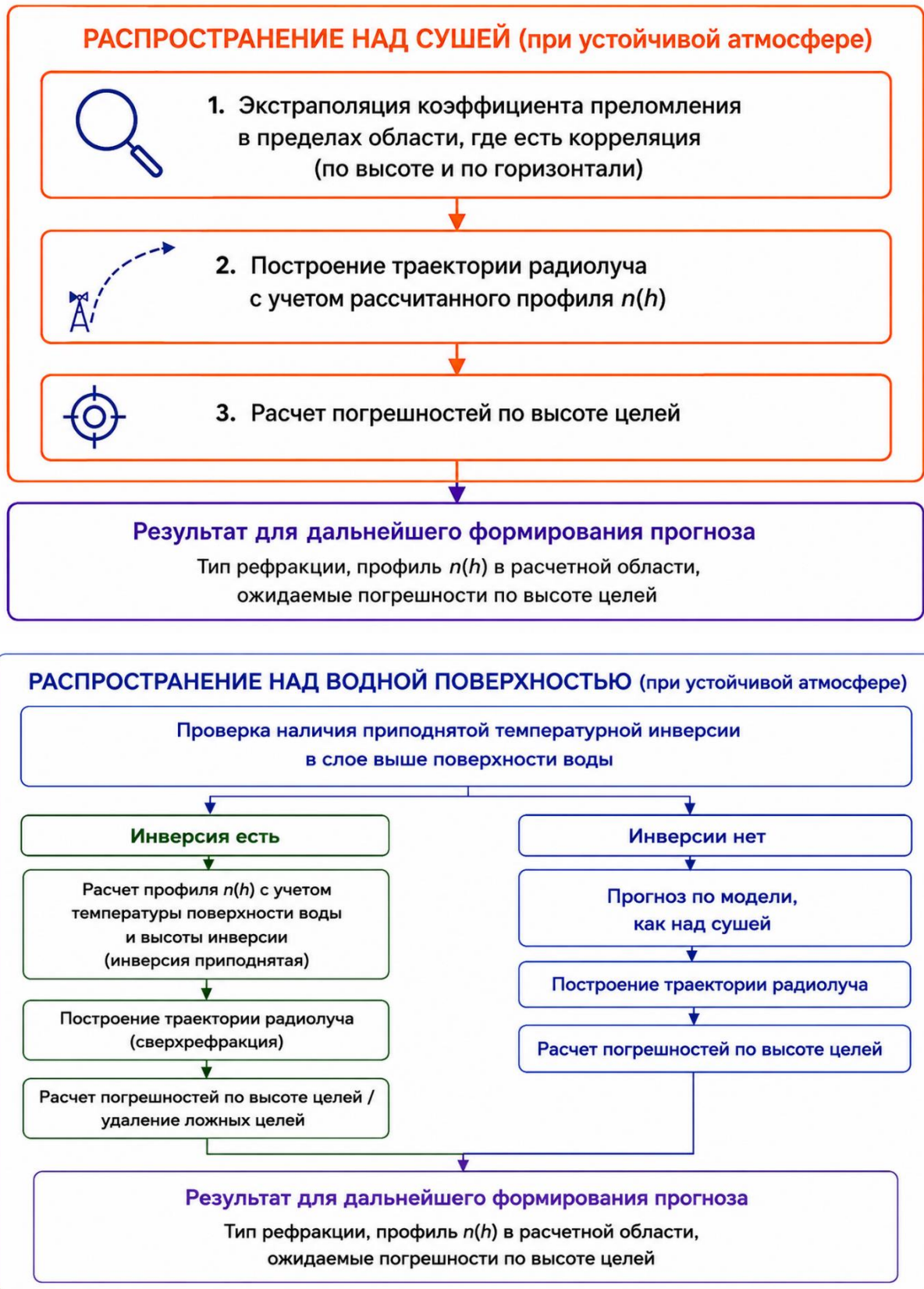


Рисунок 3.3. Блок–схема метода прогноза.

2.1. Прогноз рефракции радиоволн над различными подстилающими поверхностями при стандартной стратификации метеовеличин и при инверсии температуры

Для прогноза рефракции радиоволн по методу, описанному выше, прежде всего рассчитывались статистические характеристики рядов значений коэффициента преломления над сушей. С этой целью был сформирован архив данных высотных профилей коэффициента преломления для каждого месяца 2024 года. Год был выбран в соответствии с высокой степенью наполняемости архивов (например, в 2025 году станция аэрологического зондирования атмосферы в Воейково работала с перебоями, что привело к большим пробелам в данных). Как и в предыдущих случаях, профили пересчитывались по формуле Фрума–Эссена по данным, полученным с сайта–архива Вайомингского университета, с шагом 10 м по высоте до верхней границы 1000 м. В результате был сформирован архив, суммарно состоящий из 700 высотных профилей коэффициента преломления, который потом претерпевал сортировку.

Прежде всего архив разделялся на теплый (май – сентябрь) и холодный (октябрь – апрель) периоды. Были оставлены только данные, полученные в период устойчивого состояния атмосферы (антициклон, малоградиентный теплый сектор циклона, размытое барическое поле), поскольку, как уже было упомянуто в работе, в остальных ситуациях значения градиента коэффициента преломления (так же, как и рефракция) принимаются средними, характерными для исследуемой местности. Затем исключались сроки, в которые преобладал ветер юго–западного направления, поскольку такой ветер ведет к пролету аэрологического зонда над водной поверхностью Ладожского озера, и расчет параметров над сушей в таком случае будет искажен. Следующим шагом данные разделялись на периоды с отсутствием инверсии температуры и с ее наличием.

Далее каждый из периодов дробился на сроки 00 часов и 12 часов ВСВ. Затем для каждого профиля рассчитывались градиенты коэффициента преломления и определялся тип рефракции. В результате этого было установлено, что в холодный период, преобладающим типом рефракции является пониженная, в теплый – пониженная и нормальная. При этом было отмечено, что над сушей температурная инверсия, как приземная, так и приподнятая, не оказывает существенного влияния на изменчивость градиента коэффициента преломления, а, следовательно, и типа рефракции.

При первом этапе расчета статистических характеристик рассматривался холодный период. Сначала значения коэффициента преломления переводились в его индекс по следующей формуле:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6, \quad (53)$$

где N – значения индекса коэффициента преломления, n – значения коэффициента преломления.

Такой пересчет выполнялся из соображений упрощения оценки рассчитываемых статистических характеристик.

Затем профили индекса коэффициента преломления, полученные путем вышеописанного отбора, с октября по май, осреднялись, и на выходе было получено два высотных распределения значений индекса (за 00 часов и 12 часов), соответствующие математическому ожиданию коэффициента преломления для области проведения эксперимента (Санкт–Петербург и Ленинградская область). Далее рассчитывались значения дисперсии индекса коэффициента преломления для каждой из высот. Было установлено, что для холодного периода величина дисперсии находится в диапазоне 9 – 12.

Следующим шагом производилась экстраполяция индекса коэффициента преломления по формуле 51. При этом значения индекса на высоте антенны

пересчитывались по данным о метеовеличинах, полученным с уже упомянутой метеостанции AMTAST AW006, установленной на вышке ДМРЛ–С Воейково на высоте 30 м над уровнем земли. В результате получалось высотное распределение индекса коэффициента преломления до верхней границы 700 м. Это обусловлено тем, что именно до такой высоты наблюдаются значимые корреляционные связи значений исследуемой величины. С учетом радиуса корреляции было принято, что до расстояния 50 км от радиолокатора горизонтальный профиль индекса коэффициента преломления постоянен.

Результаты экстраполяции показали, что, согласно восстановленным профилям, в холодный период года над сушей при наличии и при отсутствии температурной инверсии в исследуемом регионе преобладает пониженный тип рефракции со средним градиентом $\frac{dn}{dz} = -2,4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м}$, при котором траектория луча обращена вогнутой стороной к поверхности земли (при стандартной стратификации – 60 случаев пониженной рефракции, 8 – нормальной; при инверсии над сушей, как приземной, так и приподнятой – только пониженная рефракция, 256 случаев). Типичная траектория луча, рассчитанная по данным экстраполяции коэффициента преломления, представлена на рисунке 3.4.

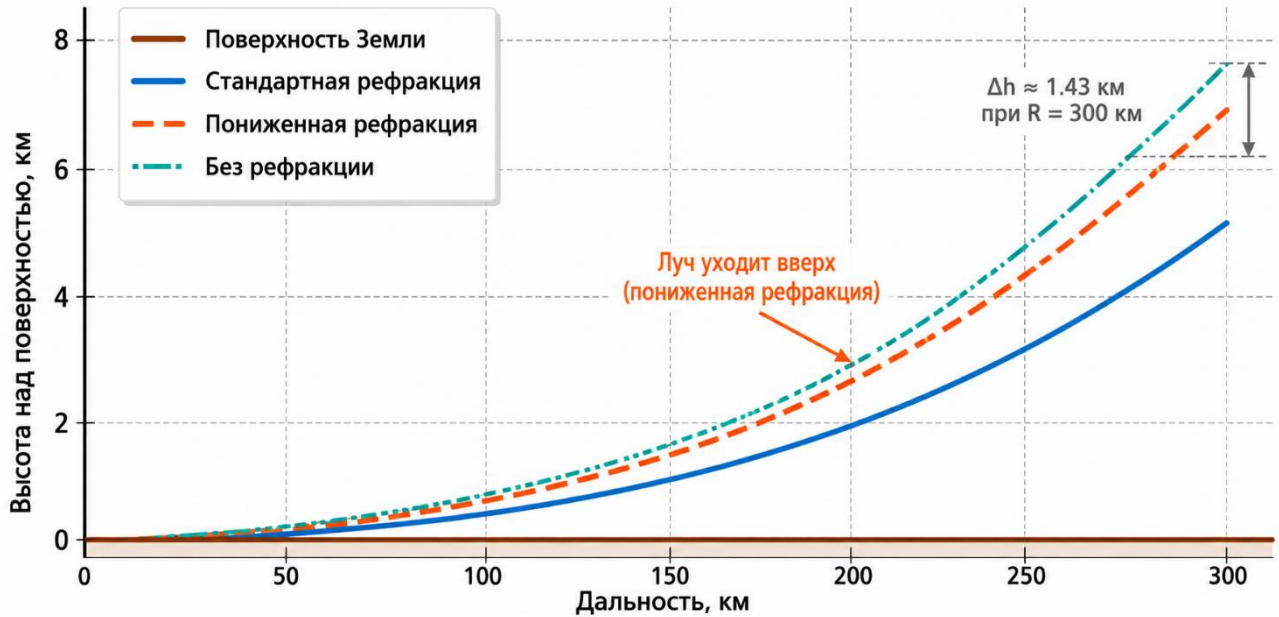


Рисунок 3.4. Типичная траектория луча ДМРЛ–С, полученная по экстраполированным данным (оранжевая пунктирная линия) в сравнении с траекторией луча при стандартном типе рефракции и при ее отсутствии

Пониженная рефракция приводит к тому, что траектория радиоволны уходит вверх по сравнению с траекторией при стандартной рефракции, что приводит к расширению «слепой» зоны радиолокатора – объекты, находящиеся близко к поверхности на больших расстояниях, становятся невидимыми для радиолокатора, так как луч проходит выше их высоты расположения. При пониженной рефракции облака и осадки на низких высотах могут быть плохо видны или вовсе не обнаружены, что влияет на качество прогнозов погоды.

Информация о том, что в холодный период года над сушей в условиях устойчивой атмосферы в Санкт–Петербурге и Ленинградской области преобладает пониженная рефракция может быть использована в практических целях. Во–первых, это позволяет учитывать завышение истинной высоты обнаружения исследуемых целей и вводить соответствующие поправки к координатам. Такие поправки следует рассчитывать по методике расчета

погрешностей при радиолокационных наблюдениях, подробно изложенной во второй главе настоящей работы. Во-вторых, метеорологи и специалисты по радиолокации могут использовать данные о сезонности и погодных условиях, при которых радиолокационные наблюдения будут менее точными.

В холодный период года при наличии температурной инверсии и при ее отсутствии над водной поверхностью Ладожского озера по данным ДМРЛ–С Воейково не наблюдалось радиолокационных погрешностей, например, отображения северного берега озера в качестве цели. Ввиду отсутствия качественных измерений профилей метеопараметров над озером, можно допустить предположение, что в холодный период в условиях устойчивой атмосферы профиль коэффициента преломления над водой будет соответствовать его профилю над сушей. Тогда правильным будет вывод о том, что над поверхностью озера в этот период также преобладает пониженная рефракция, что подтверждается отсутствием погрешностей (например, отсутствием свехрефракции) в это период по данным радиолокатора.

Затем весь расчет повторялся уже для теплого периода (июнь–сентябрь). В ходе расчетов были получены математические ожидания индекса коэффициента преломления и его дисперсии для каждой высоты. Было установлено, что значения дисперсий находятся в диапазоне 10–15. Дисперсия коэффициента преломления выше в теплый период года вследствие увеличенной влажности воздуха и более активных молекулярных процессов, которые усиливают зависимость показателя преломления от длины волны. В холодный период воздух суше и плотнее, что снижает вариации показателя преломления и, соответственно, дисперсию.

В теплый период года в исследуемом регионе при отсутствии инверсии над сушей и над водой, и при наличии инверсии над сушей преобладает пониженная и нормальная рефракция. При экстраполяции данных о коэффициенте преломления по траектории распространения волны расчеты показывают также

пониженную и нормальную рефракцию в разные сроки (при наличии и отсутствии инверсии над сушей – 77 случаев пониженной; при отсутствии инверсии или приземной инверсии над водой – пониженная рефракция, 54 случая). При этом форма луча будет соответствовать оранжевой пунктирной линии на рисунке 3.3 при пониженной рефракции и синей сплошной линии при нормальной рефракции.

Поскольку радиолокатор в теплый период года при наличии температурной инверсии воспринимает северный берег Ладожского озера в качестве цели, то в этом случае можно говорить о траектории луча, отличной от траекторий при нормальном и пониженном типе рефракции. Поскольку луч явно в этом случае упирается в землю, можно сделать вывод о наличии сверхрефракции над водной поверхностью озера в теплый период года при наличии температурной инверсии. В сентября 2024 года было зафиксировано 14 случаев сверхрефракции – 2, 4, 6 – 15, 17 и 25 числа. Такие случаи требуют особого учета, поскольку, как уже было доказано в главе 2, именно при сверхрефракции наблюдаются наибольшие погрешности в определении координат целей и ложные цели. В этом случае необходимо подробно рассматривать метеорологические условия, приводящие к возникновению сверхрефракции над водой, а также строить особую математическую модель расчета траектории луча.

Выводы к третьей главе

1. Установлено, что различия в распределении водяного пара над сушей и водной поверхностью приводят к изменению вертикального профиля коэффициента преломления атмосферы и, как следствие, к изменению траектории распространения радиолокационного луча. Также показано, что влияние водной поверхности на распространение радиоволн является максимальным при расположении водоёма вблизи радиолокатора, когда распространение радиолуча происходит в приземном слое атмосферы, характеризующемся наибольшими градиентами коэффициента преломления;

2. Показано, что с увеличением расстояния от радиолокатора влияние подстилающей поверхности уменьшается вследствие увеличения высоты прохождения радиолуча и ослабления влияния приземного слоя атмосферы;

3. На основе анализа пространственной изменчивости коэффициента преломления разработан метод учета и прогноза рефракции радиоволн, основанный на использовании локальных метеорологических измерений на уровне расположения антенны радиолокатора;

4. Была произведена апробация разработанного метода для случая безводной подстилающей поверхности при условии стандартного высотного распределения метеовеличин и наличия температурной инверсии, а также для водной поверхности при условии стандартного высотного распределения метеовеличин и приземной температурной инверсии. Во всех случаях метод показал хорошие результаты.

ГЛАВА 4. ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВЕРХРЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН НАД АКВАТОРИЕЙ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ РАДИОЛОКАТОРА

1. Метеорологические условия, приводящие к возникновению сверхрефракции над водоемами. Анализ синоптической ситуации над Ладожским озером при наличии сверхрефракции

Во второй главе настоящей работы было доказано, что именно в случае сверхрефракции необходимо уделять пристальное внимание возникающим погрешностям и удалению ложных целей.

Известно [2, 8], что сверхрефракция в атмосфере возникает вследствие температурной инверсии. Причем особенно выражен такой тип рефракции над обширными водными объектами – озерами, водохранилищами и т. д. Это подтверждается многолетними наблюдениями, произведенными ДМРЛ–С Воейково, расположенном в поселке Воейково Ленинградской области. Как уже было упомянуто, в сентябре 2024 года наблюдалось 14 дней со сверхрефракцией, возникающей над Ладожским озером. В эти дни локатор фиксировал в качестве цели очертания северного берега озера. Такая ситуация наблюдалась 2, 4, 6 – 15, 17 и 25 сентября, в среднем с 9 до 14 часов ВСВ.

При анализе данных аэрологического зондирования (высотных профилей влажности, температуры и давления) было обнаружено, что в дни появления сверхрефракции, в 00 часов ВСВ всегда наблюдалась приземная температурная инверсия, а в 12 часов – приподнятая на высоте 2 – 3 км. Значит, можно предположить, что именно наличие инверсионных слоёв вызывают преломление

луча по типу сверхрефракции. Частные случаи высотных профилей температуры с инверсией представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

**26075 ULLI St. Petersburg (Voejkovo) Observations at 00Z
10 Sep 2024**

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1007.0	72	13.0	10.9	87	8.19	130	4	285.6	308.5	287.0
1000.0	134	14.6	11.5	82	8.59	150	12	287.8	312.0	289.2
991.0	211	16.4	12.0	75	8.96	170	23	290.3	315.8	291.9
980.0	307	21.0	13.0	60	9.69	172	24	295.9	324.1	297.6
958.0	504	19.4	9.4	52	7.78	177	24	296.2	319.0	297.6
925.0	805	16.8	6.8	52	6.74	185	25	296.5	316.4	297.7
850.0	1519	10.2	3.2	62	5.70	185	23	296.8	313.8	297.8
816.0	1855	6.9	1.9	71	5.42	190	23	296.8	313.0	297.8
787.0	2152	4.0	0.8	80	5.18	181	22	296.8	312.3	297.7
776.0	2267	6.2	-1.8	57	4.34	177	22	300.3	313.7	301.1
762.0	2416	5.8	-13.2	24	1.82	172	22	301.5	307.4	301.8
755.0	2491	5.4	-14.2	23	1.69	170	21	301.9	307.4	302.2

Рисунок 4.1 – Данные аэрологического зондирования за 10 сентября 2024 года за 00 часов ВСВ. Наблюдается приземная инверсия

26075 ULLI St.Petersburg(Voejkovo) Observations at 12Z 10 Sep 2024

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1004.0	72	25.2	13.2	47	9.58	150	10	298.0	326.2	299.7
1000.0	106	25.0	13.0	47	9.49	150	10	298.1	326.1	299.9
985.0	237	23.7	11.9	48	8.94	140	16	298.1	324.5	299.7
925.0	781	18.2	7.2	49	6.93	155	23	297.9	318.5	299.2
890.0	1108	14.6	4.6	51	6.01	162	30	297.5	315.4	298.6
850.0	1494	11.8	2.8	54	5.54	170	37	298.5	315.2	299.5
790.0	2101	6.2	-0.0	65	4.87	175	37	298.8	313.5	299.7
786.0	2144	5.8	-0.2	65	4.82	176	36	298.8	313.4	299.7
751.0	2515	3.0	-5.0	56	3.53	183	32	299.7	310.6	300.3
749.0	2537	2.8	-4.2	60	3.76	184	32	299.7	311.3	300.4
735.0	2690	3.6	-15.4	23	1.58	187	30	302.2	307.4	302.5
711.0	2960	3.0	-19.0	18	1.20	192	27	304.4	308.4	304.6
700.0	3086	2.2	-19.8	18	1.14	195	25	304.9	308.7	305.1
697.0	3120	1.9	-19.9	18	1.14	195	23	305.0	308.8	305.2
666.0	3485	-0.7	-20.7	20	1.11	189	24	306.0	309.8	306.2
623.0	4012	-5.1	-10.1	68	2.86	179	25	306.9	316.1	307.4
621.0	4037	-5.1	-10.1	68	2.87	179	25	307.1	316.4	307.7
560.0	4843	-8.3	-28.3	18	0.67	165	26	312.6	315.0	312.7
546.0	5038	-9.1	-28.1	20	0.70	161	27	313.9	316.4	314.0
522.0	5381	-12.1	-27.5	27	0.77	155	27	314.4	317.1	314.5
500.0	5710	-14.9	-26.9	35	0.85	165	25	314.8	317.8	315.0
483.0	5971	-17.1	-27.1	42	0.86	170	25	315.2	318.3	315.4
474.0	6111	-17.7	-27.7	41	0.83	172	24	316.2	319.2	316.3
449.0	6510	-20.4	-33.3	31	0.52	180	23	317.7	319.6	317.8

Рисунок 4.2 – Данные аэрологического зондирования за 10 сентября 2024 года за 12 часов ВСВ. Наблюдается приподнятая инверсия

На рисунке 4.3 представлен случай свехрефракции 10 сентября, полученный в канале отражаемости вышеупомянутого ДМРЛ–С. В этот день свехрефракция по данным радиолокатора наблюдалась с 9 до 15 часов ВСВ. Из рисунка видно, что картина отражаемости повторяет очертания береговой линии озера, что может являться лишь результатом свехрефракции.

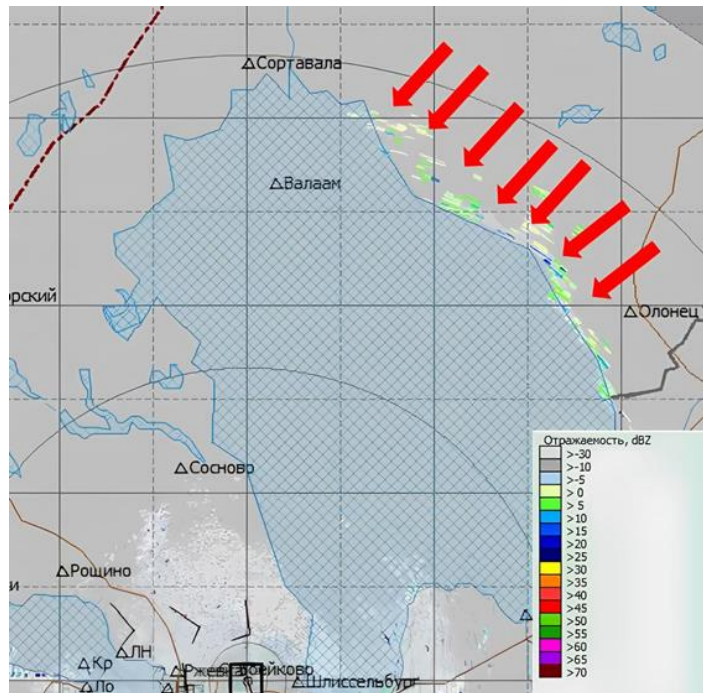


Рисунок 4.3 – Случай сверхрефракции по берегу Ладожского озера, зарегистрированный ДМРЛ–С Воейково 10 сентября 2024 года в 12.00 ВСВ

Доказательством того, что обнаруженная цель не связана с метеорологическими явлениями, а является результатом искривления радиолокационного луча из-за явления сверхрефракции, служит, во-первых, анализ синоптической карты за 12:00 ВСВ 10 сентября 2024 года. Фрагмент этой карты представлен на рисунке 4.4. Согласно данным метеорологических станций, расположенных на побережье Ладожского озера, в указанное время облачность отсутствовала (0 баллов).

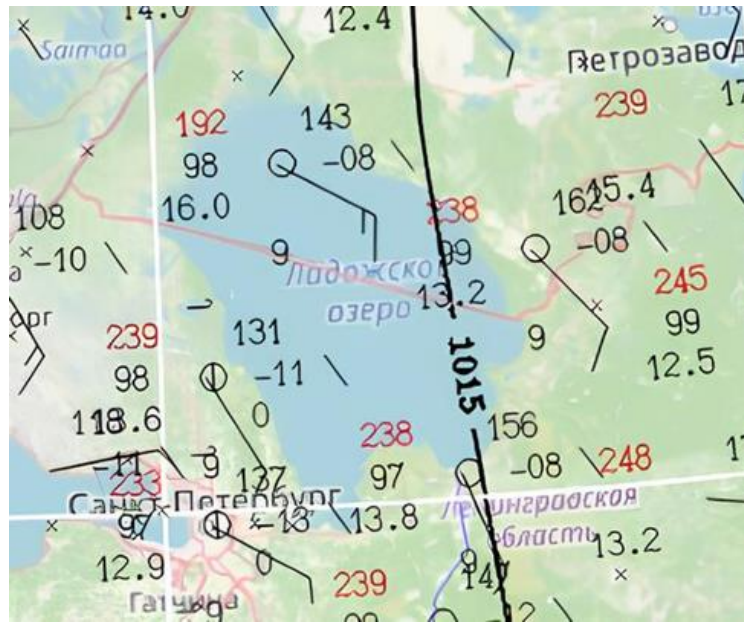


Рисунок 4.4 – Фрагмент синоптической карты приземного анализа за срок
12.00 ВСВ 10 сентября 2024 года

Вторым подтверждением наличия именно сверхрефракции в указанные даты служит величина модуля коэффициента кросскорреляции для обнаруженных целей. Такой коэффициент характеризует взаимную коррелированность вертикальной и горизонтальной поляризаций рассеянного сигнала. По этой величине можно судить о том, является ли цель метеорологической или нет.

В случае отсутствия гидрометеоров отраженный сигнал от атмосферы (примесей, содержащихся в ней) становится слабым, поскольку рассеяние определяется преимущественно молекулярными процессами. Это связано с тем, что в ясной безоблачной атмосфере отсутствуют крупные частицы (капли, кристаллы льда), которые могли бы эффективно отражать радиоволны.

На рисунке 4.5 представлены величины модуля коэффициента кросскорреляции для обнаруженной цели 10 сентября 2024 года в 12.00 ВСВ. Анализируя эти величины, можно отметить, что подавляющее большинство из

них не превышает 0.6. Типичные значения коэффициента кросскорреляции в облаках составляют 0,97 – 0,99 для однородных облаков с жидкими каплями. В зонах смешанной фазы осадков его значения могут снижаться до 0,6 – 0,9. Учитывая, что наземные метеостанции не фиксировали облачность в исследуемом регионе за исследуемый срок, можно сделать вывод, что цель, наблюдаемая локатором, является не облачной структурой, а северным берегом Ладожского озера, отображающимся в результате сверхрефракции.

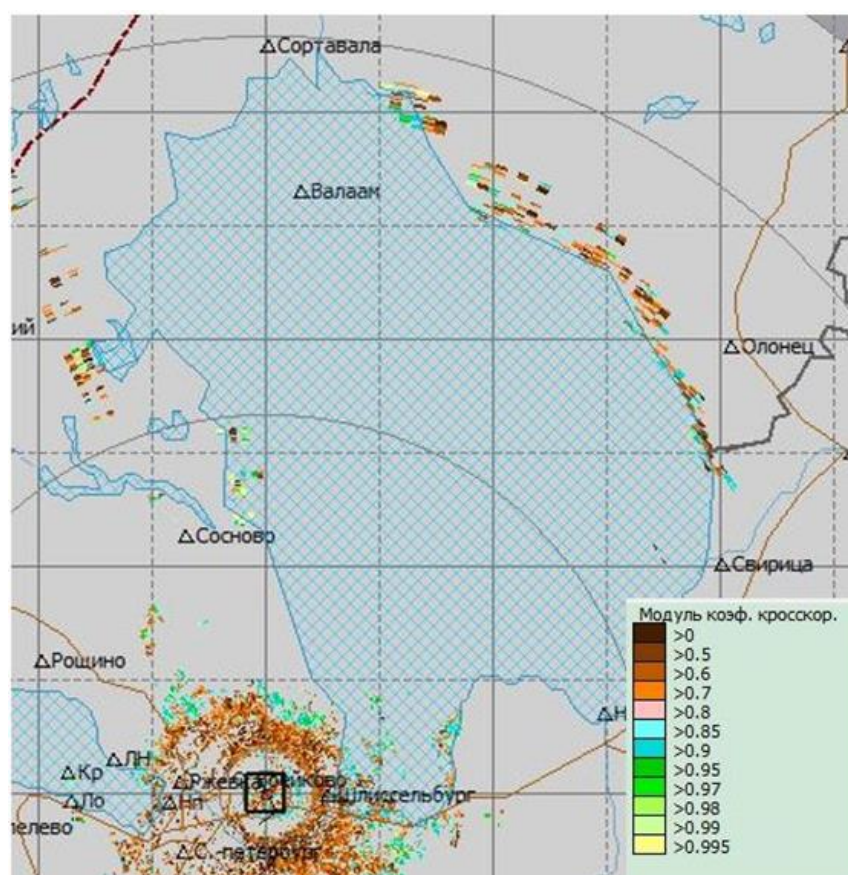


Рисунок 4.5 – Значения модуля коэффициента кросскорреляции для случая сверхрефракции 10 сентября 2024 года

Наконец, неочевидным доказательством того, что такие цели не являются метеорологическими образованиями, является идентичная форма картины отражаемости, выявленная при анализе карт, полученных с радиолокатора. Установлено, что во все вышеперечисленные сроки наблюдений, картина отражаемости очень точно повторяет очертания береговой линии озера.

Затем производился анализ карт синоптических ситуаций за 10 сентября 2024 года с целью оценить погодную ситуацию, при которой возникла сверхрефракция и сопоставить ее с ситуацией, выдвинутой в вышеизложенной теории о возникновении сверхрефракции.

Синоптическую ситуацию в один из дней, когда наблюдалась сверхрефракция, демонстрирует карта, представленная на рисунке 4.6. 10 сентября 2024 года погода в Ленинградской области у земли определялась западной периферией обширного антициклона, центр которого в 12 ВСВ располагался над центральным Уралом с давлением в центре 1029,7 гПа. Антициклон высокий, стационарный.

С запада от Ленинградской области располагалась двухцентровая циклоническая депрессия, один из центров которой находился на юге Норвежского моря, с давлением в центре 982 гПа, а другой – на северо–западе Скандинавского полуострова, с давлением в центре 986 гПа. Оба циклона окклюдированы. От циклона на северо–западе Скандинавии проходил холодный фронт с севера на юг вдоль Ботнического залива и Балтийского моря. Циклон с юга Норвежского моря смещался на юго–запад Скандинавии, а циклон с северо–запада Скандинавии смещался на север Норвежского моря.

На территории Ленинградской области преобладала малооблачная погода со средним ветром 2 – 7 м/с, максимальные порывы на водной акватории Ладожского озера и восточной части Финского залива составили 10 – 12 м/с. Температура воздуха в 09 – 12 ВСВ находилась в пределах плюс 22... плюс 25°C, атмосферное давление – 1010 – 1016 гПа.

На высотах погода Ленинградской области определялась западной периферией высокого стационарного антициклона. До высоты 9 км над Ленинградской областью наблюдался южный поток со скоростями 5 – 8 м/с до высоты 300 м (5 м/с в нижнем 100–метровом слое) и со скоростями 12 – 19 м/с до высоты 7 км.

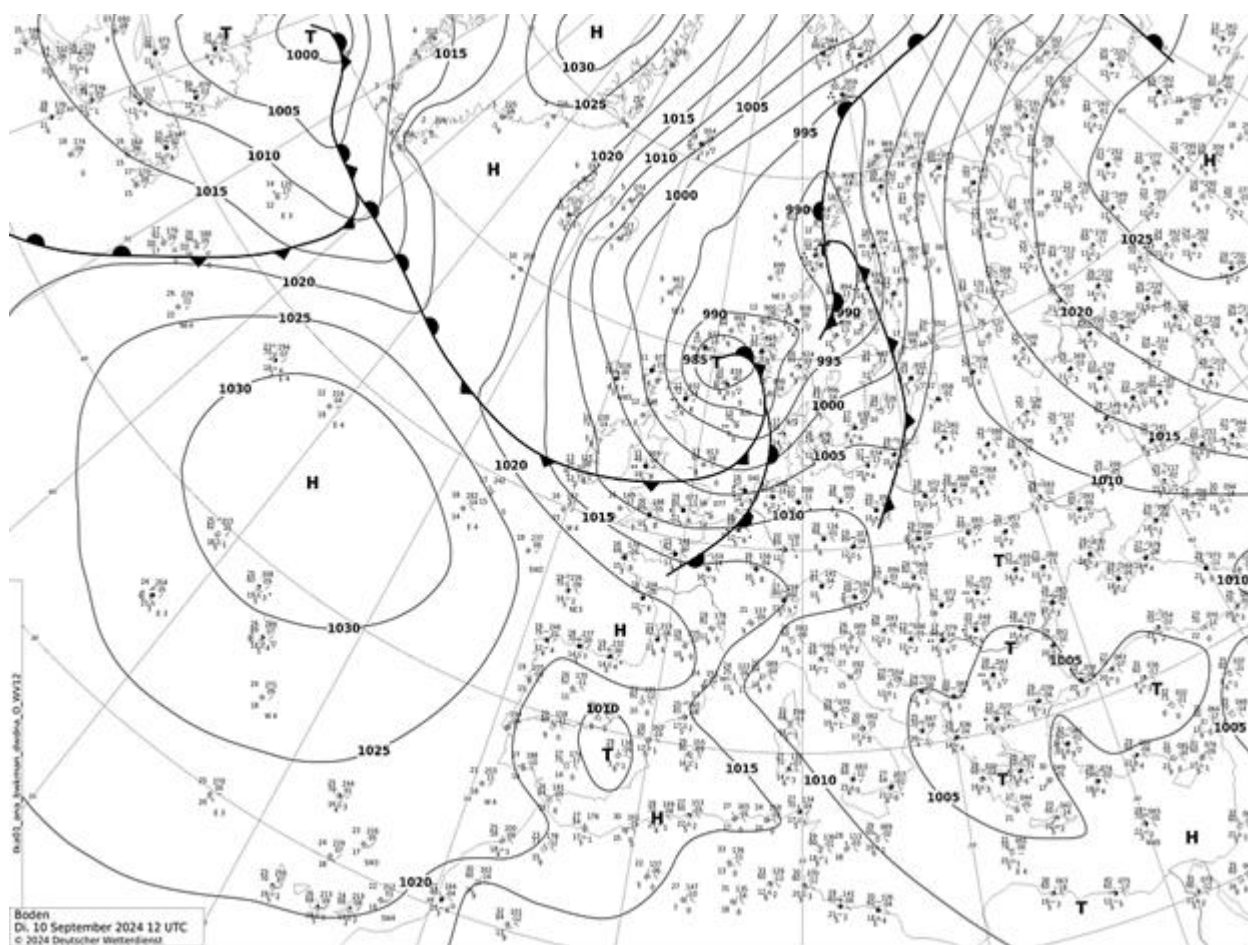


Рисунок 4.6 – Приземная синоптическая карта за срок 12 ВСВ 10 сентября 2024 года

Для формирования сверхрефракции над водной поверхностью должен присутствовать инверсионный слой атмосферы. В настоящее время в литературе приводится только общая физическая связь температурной инверсии с возникновением сверхрефракции радиоволн, включая сверхрефракцию и тропосферные волноводные режимы. Однако, до настоящего времени до сих пор не рассмотрен физически важный сценарий, при котором сверхрефракция возникает в пространственно–неоднородной переходной зоне «суша – вода», где происходит резкая перестройка тепловых и турбулентных характеристик приземного слоя атмосферы. Именно этот переходный режим не рассматривается в литературе в отличие от однородных условий над сплошной сушей или сплошной водой.

Температурная инверсия – это состояние, при котором значения температуры увеличиваются с высотой [2], а не уменьшаются, как при стандартной стратификации. Вследствие повышения температуры в слое инверсии восходящие воздушные потоки ослабевают, так как более холодный воздух внизу имеет плотность больше, чем теплый воздух в вышележащих слоях.

Возникновению приземной (приводной) инверсии температуры может способствовать антициклональный характер погоды, сопровождающийся отсутствием облаков [8]. Градиент температуры при инверсии может достигать $10^{\circ}/1000$ м, то есть по модулю он имеет примерно то же значение, что и сухоадиабатический градиент при нормальной стратификации температуры. Нагревание подстилающей поверхности солнечной радиацией увеличивает температуру воздуха в приземном слое, что приводит к изменению знака градиента температуры, то есть к исчезновению инверсии в приземном (приводном) слое и замене инверсионного хода температуры нормальной стратификацией – то есть уменьшением температуры с высотой. На большей высоте влияние нагретой поверхности ослабевает и, начиная с некоторой высоты, распределение температуры в атмосфере сохраняет инверсионный характер. В

этом случае имеет место приподнятая инверсия. Восходящие потоки воздуха в этом случае достаточно слабые, поэтому весь испаряемый подстилающей поверхностью водяной пар остается в приземном слое.

В случае приподнятой инверсии над водой водяной пар может циркулировать в подинверсионном слое под действием местного ветра – бриза. В таком случае оптическая плотность подинверсионного слоя максимальна вследствие высокой концентрации водяного пара, значит, показатель преломления в этом слое тоже достигает максимальных значений, что и приводит к искривлению траектории электромагнитной волны с образованием сверхрефракции, поскольку волна переходит из оптически менее плотного слоя в оптически более плотный слой атмосферы.

К сожалению, ввиду отсутствия технических средств и финансового обеспечения, провести аэрологическое зондирование атмосферы над Ладожским озером и оценить наличие температурной инверсии над водой в исследуемый период было невозможно. В настоящий момент на сети станций Росгидромета отсутствуют аэрологические станции, проводящие зондирование атмосферы над внутренними водными объектами России.

Однако, в качестве гипотезы можно предположить наличие приподнятой инверсии над акваторией Ладожского озера. Это вытекает из того факта, что приподнятые инверсии часто образуются, когда теплый, менее плотный воздух движется над холодной водной поверхностью. В таком случае создаются условия, при которых более нагретый воздух «плавает» над холодным, что формирует инверсионный слой. Приподнятые инверсии формируются в условиях устойчивой стратификации атмосферы, когда отсутствуют сильные ветры, способствующие перемешиванию слоев воздуха. Это позволяет тепловому воздуху оставаться над холодным, создавая инверсию. Принимая во внимание эти факты, можно предположить, что в указанный срок теплый воздух с суши (инверсионный слой) перемещался на остывшую поверхность Ладожского озера,

натекающая на холодный воздух у водной поверхности и тем самым создавая слой атмосферы с более высокой температурой, то есть формируя над водой приподнятую инверсию. Эта гипотеза подтверждается данными о метеорологической ситуации, детально изученной по синоптическим картам и описанной выше.

Основываясь на изложенной выше гипотезе, моделировались метеорологические условия над Ладожским озером, приводящие к сверхрефракции и на основе модели рассчитывалось распределение высотного профиля коэффициента преломления и расчет его градиента с определением типа рефракции.

Ладожское озеро – крупный водоем с большой площадью поверхности. Из-за своей протяженности и объема озеро обладает высокой теплоемкостью, что замедляет нагрев и охлаждение воды по сравнению с сушей. Это приводит к тому, что, во-первых, в теплый период вода в озере прогревается медленнее, чем окружающая суша. Во-вторых, испарение с поверхности озера насыщает нижний слой атмосферы влагой, повышая влажность воздуха над поверхностью воды и в прибрежной зоне.

В теплое время суток, особенно с утра и примерно до 13–15 часов, солнечная радиация нагревает поверхность озера. В результате испарения воды с поверхности нижний слой атмосферы интенсивно насыщается водяным паром. При этом влажный воздух у поверхности воды может быть относительно прохладным, особенно если вода еще не сильно прогрелась, что создает условия для возникновения устойчивого вертикального слоя с высокой влажностью. Высота такого слоя будет примерно соответствовать высоте температурной инверсии, поскольку выше этого слоя наблюдается резкое падение значений парциального давления водяного пара, а, следовательно, и влажности воздуха. Значения парциального давления будут постепенно уменьшаться от уровня

поверхности воды, где парциальное давление равно давлению насыщения, до высоты температурной инверсии.

В результате подобного распределения линии равных значений парциального давления водяного пара формируют над озером призму. Такая призма представляет собой трехмерную область с резким вертикальным и горизонтальным градиентом парциального давления. Снизу она ограничена поверхностью озера, сверху – слоем инверсии, а по бокам – распространяется на прилегающую сушу, формируя над сушей клин влажного и прохладного воздуха (см. рисунок 4.7). В этом клине влажность остается высокой, а температура воздуха ниже, чем в окружающем более сухом и теплом воздухе над сушей.

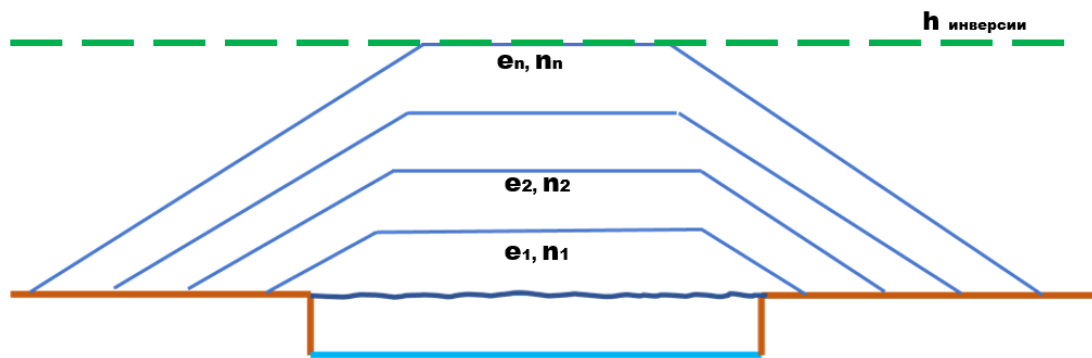


Рисунок 4.7 – Призма, образованная линиями равных значений парциального давления водяного пара (так же и коэффициента преломления)

Механизм формирования такой структуры следующий – в дневное время поверхность суши нагревается быстрее, чем поверхность озера, и это создает область пониженного давления над сушей и более высокого давления над озером. В результате более холодный и влажный воздух с озера начинает перемещаться в сторону суши – формируется дневная бризовая циркуляция [8]. Дневной бриз переносит прохладный и влажный воздух с поверхности Ладожского озера на

сушу, поднимая его в нижние слои атмосферы, ограниченные высотой 100 – 200 м.

При антициклональном характере погоды (в случае ясного неба и при слабом ветре) вертикальное перемешивание воздуха ограничено. Влажный воздух, поднимающийся с озера, оказывается «заперт» под более теплым и сухим воздухом над сушей, поэтому клиновидная структура линий равных значений парциального давления водяного пара может довольно долго сохраняться, проникая вглубь суши.

Таким образом, призма, образуемая линиями равных значений парциального давления водяного пара, представляет собой особое распределение влажности, характерное для территории Ладожского озера и его прибрежных зон, возникающее при приподнятой температурной инверсии и поддерживаемое дневным бризом и устойчивой стратификацией атмосферы. Именно такая структура эффективно создает условия возникновения свехрефракции радиоволн, наблюдаемой ДМРЛ–С в Воейково. Радиолокационный луч проходит через клин призмы, постепенно распространяясь из слоев с низкими значениями парциального давления в слои с высоким значением парциального давления. Следовательно, траектория волны постепенно проходит от слоев с низкими значениями коэффициента преломления n к слоям с высокими значениями. То есть луч переходит из менее оптически плотных слоев в более оптически плотные, что вызывает его преломление и изгиб траектории, соответствующий свехрефракции.

При отсутствии приподнятой температурной инверсии призма влажного воздуха не формируется, и, как следствие, не возникает свехрефракция радиоволн. Это происходит из-за того, что если приподнятой инверсии нет, то температура с высотой имеет стандартный ход, а значит, атмосфера становится менее устойчивой. При этом возникает активное вертикальное перемешивание и турбулентность, которые размывают локальные слои влажности. Поэтому

влажный воздух у поверхности озера быстро смешивается с более сухим воздухом выше. Без «крышки» температурной инверсии влажный воздух не удерживается в нижнем слое, и призматическая структура линий равных значений парциального давления водяного пара не возникает. Отсюда следует, что градиенты влажности и показателя преломления становятся более плавными и менее выраженными, что приводит к отсутствию условий для возникновения сверхрефракции.

Таким образом, можно сделать вывод, что сверхрефракция над водоемами, в частности над Ладожским озером, может появляться в случае одновременного возникновения нескольких метеорологических ситуаций. Зная эти ситуации и факторы, к ним приводящие, можно говорить о прогнозе и учете типа рефракции при производстве радиолокационных наблюдений.

Во-первых, обязательным условием возникновения сверхрефракции над водными объектами является наличие приподнятой инверсии температуры над водной поверхностью, поскольку именно в таком случае формируется запирающий слой, являющийся первостепенной причиной изменения оптической плотности слоев атмосферного воздуха.

Во-вторых, очень большую роль в искривлении траектории волны по типу сверхрефракции играет динамическая стабильность слоев атмосферы, то есть отсутствие сильного ветра и перемешивания. Такие условия позволяют инверсии температуры и градиентам влажности сохраняться дольше. Могут наблюдаться следующие метеорологические условия, при которых это возможно:

- при перемещении теплых сухих воздушных масс с суши на более холодную водную поверхность в летнее время;
- над сушей при ясной безоблачной погоде ночью, при возникновении приземных радиационных инверсий температуры, сопровождающихся образованием росы;

– в антициклональных областях (зонах повышенного давления), вследствие оседания воздуха на верхних уровнях при образовании так называемой инверсии сжатия [41]. Следует отметить, что в дни выпадения осадков сверхрефракция, как правило, не наблюдается.

Сопоставляя вышеописанные факторы, можно говорить о прогнозе ситуаций, при которых будет возникать сверхрефракция в слоях атмосферы вблизи водоема и над его поверхностью. Учитывая отсутствие аэрологических наблюдений над водными объектами, можно рекомендовать развивать аэрологическую сеть и в целях повышения качества получаемой радиолокационной информации открывать новые аэрологические станции с выпуском зондов над водными объектами.

Однако, в отсутствие аэрологической информации над водоемами, при прогнозе сверхрефракции можно обойтись данными, получаемыми с наземных метеорологических станций. Следует отметить, что в данном случае также нужна информация о распределении метеопараметров в непосредственной близости от радиолокатора, то есть необходимым условием качественного прогноза будет установка датчиков на соответствующей высоте. Учитывая корреляционные связи коэффициента преломления в пространстве, обнаруженные во второй главе, можно говорить о разработке модели прогноза рефракции в атмосфере и последующем ее использовании для учета погрешностей, вносимых рефракцией в координаты целей.

2. Моделирование траектории электромагнитной волны в призме, образованной над Ладожским озером

Очевидно, что траектория электромагнитной волны радиолокатора при прохождении через призму водяного пара, представленную на рисунке 4.7, будет отличаться от траектории ее прохождения через сферически слоистую атмосферу. Следовательно, модель расчета траектории, представленная в главе 2 настоящей работы будет непригодна для расчета в случае наличия на пути следования волны радиолокатора обширных водных поверхностей.

Анализируя призму, можно сказать, что волна прежде всего пройдет через клиновидную структуру, образованную линиями равных значений парциального давления водяного пара над сушей и в прибрежной части озера, а затем через плоскопараллельный участок над самим озером. Поскольку нижние слои атмосферы более насыщены водяным паром вследствие процессов, подробно описанных ранее, можно сделать вывод, что самый большой и значимый загиб траектории происходит именно в клине призмы, выдающемся на сушу. Геометрия луча радиолокатора при прохождении через клин в таком случае будет соответствовать рисунку 4.8.

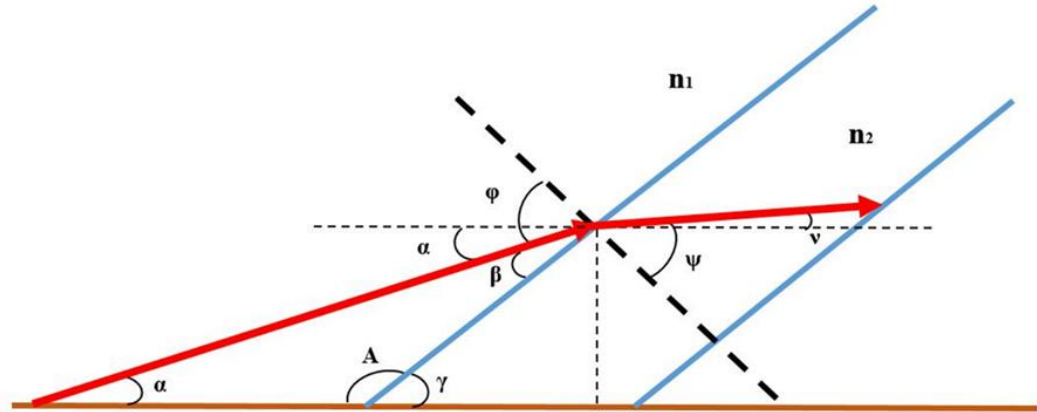


Рисунок 4.8 – Геометрия луча, проходящего через клин призмы

Здесь α – угол места локатора; β – угол между лучом и поверхностью клина, образованного линиями равных значений парциального давления водяного пара; γ – угол наклона клина; φ – угол падения луча; ψ – угол преломления луча; ν – угол между направлением луча и горизонталью; n_1 и n_2 – коэффициенты преломления в первом и втором слое соответственно.

Следует отметить, что из-за особенностей наклона линий равных значений коэффициента преломления в клиновидном участке, при определении типа рефракции нельзя руководствоваться общепринятыми значениями градиентов, поскольку все они были рассчитаны для сферически слоистой атмосферы. В случае сверхрефракции луч на определенном расстоянии от радиолокатора будет упираться в землю, что может быть качественно подтверждено расчетами – в такой ситуации на определенном шаге расчета значение высоты перехода луча из одного слоя в другой будет равно нулю.

Для расчета траектории луча необходимо знать расстояние от точки расположения радиолокатора до начала клиновидной части призмы. Учтем, что распространение водяного пара обусловлено дневной бризовой циркуляцией. Согласно исследованиям влияния Ладожского озера на климат прибрежных зон [42], бриз распространяется на расстояние 15 км от берега в обе стороны (см.

рисунок 4.9). Следовательно, воздух, насыщенный водяным паром, распространяется от озера вглубь суши на такое же расстояние. С другой стороны, на верхней границе инверсионного слоя происходит обратное распространение сухого воздуха над озером. Значит, содержание водяного пара будет определяться, с одной стороны, его распространением на сушу от озера с одновременным подъемом вверх, что приводит к уменьшению парциального давления, а с другой стороны, перемещением сухого воздуха в верхних слоях инверсии над озером. Следовательно, парциальное давление водяного пара у поверхности земли на расстоянии 15 км от берега в сторону суши будет равно парциальному давлению на расстоянии 15 км от берега в сторону водной поверхности на верхней границе инверсионного слоя. Это приводит к равным значениям в указанных точках коэффициента преломления воздуха ($n = n'$ на рисунке 4.9).

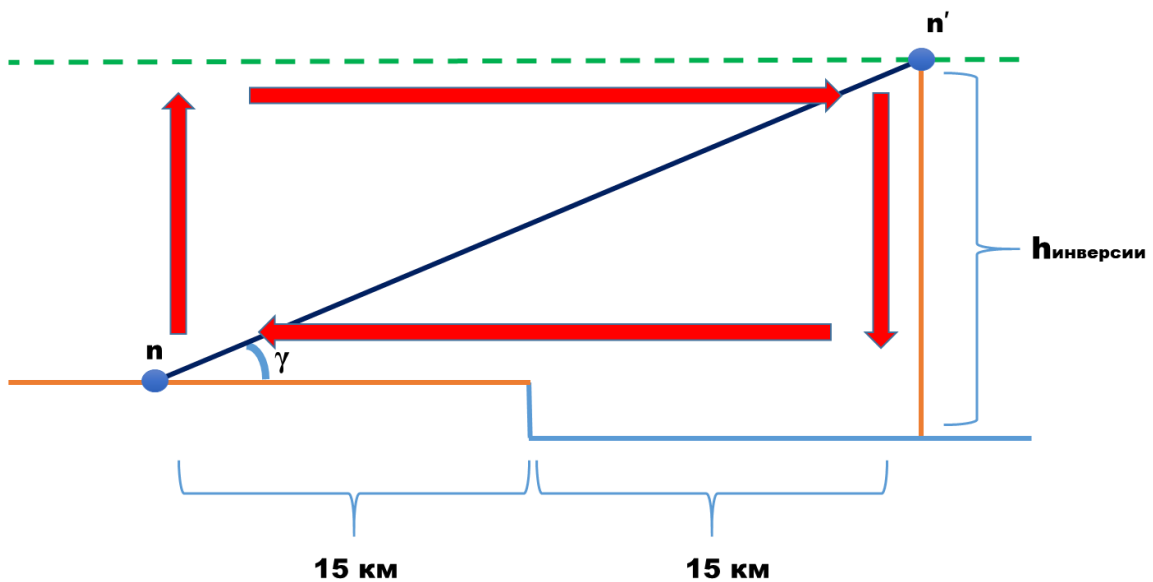


Рисунок 4.9 – Схематичное изображение процессов, происходящих при формировании клина. Красными стрелками обозначено направление ветра (бризовой циркуляции), зеленый пунктир – нижняя граница инверсии

С использованием высоты нижней границы инверсии, полученной по данным аэрологического зондирования над сушей, с учетом предположения, что над водой она остается такой же, был рассчитан угол наклона линий равных значений парциального давления водяного пара в клине призмы (угол γ на рисунке 4.9). Следует учитывать, что высота инверсии изменчива, поэтому данный угол необходимо вычислять отдельно при расчете каждого случая. Расчеты показали, что угол изменяется в пределах от $1,5^\circ$ до $4,7^\circ$.

С учетом этих значений далее необходимо определять углы падения и преломления в каждом слое и значения наклонной дальности и высоты луча при переходе из одного слоя в другой для построения траектории. Количество слоев может быть определено исходя из высоты слоя инверсии. В первом приближении можно допустить, что расстояние между двумя соседними слоями с разными значениями коэффициента преломления равно 100 м. Подробная методика такого расчета траектории, основанная на элементарной геометрии, описана во второй главе. Следует также учитывать, что в данном случае расчет состоит из трех этапов.

Первый этап – расчет траектории луча над сушей и высоты его входа в клин призмы. С этой целью по формуле 51 производилась экстраполяция профиля коэффициента преломления на расстояние от места установки радиолокатора до начала клина. Такое расстояние вычислялось как разность расстояния от радиолокатора до берега озера (30 км) и расстояния от точки начала клина до берега озера (15 км). Таким образом, было установлено, искомое расстояние от радиолокатора до точки начала клина не зависит от высоты верхней границы инверсии и составляет 15 км. Результаты экстраполяции показали, что высотное распределение коэффициента преломления в месте установки радиолокатора практически совпадает с высотным распределением в точке начала клина.

Высота точки входа луча в клин определялась в соответствии с геометрией луча, представленной на рисунке 4.10.

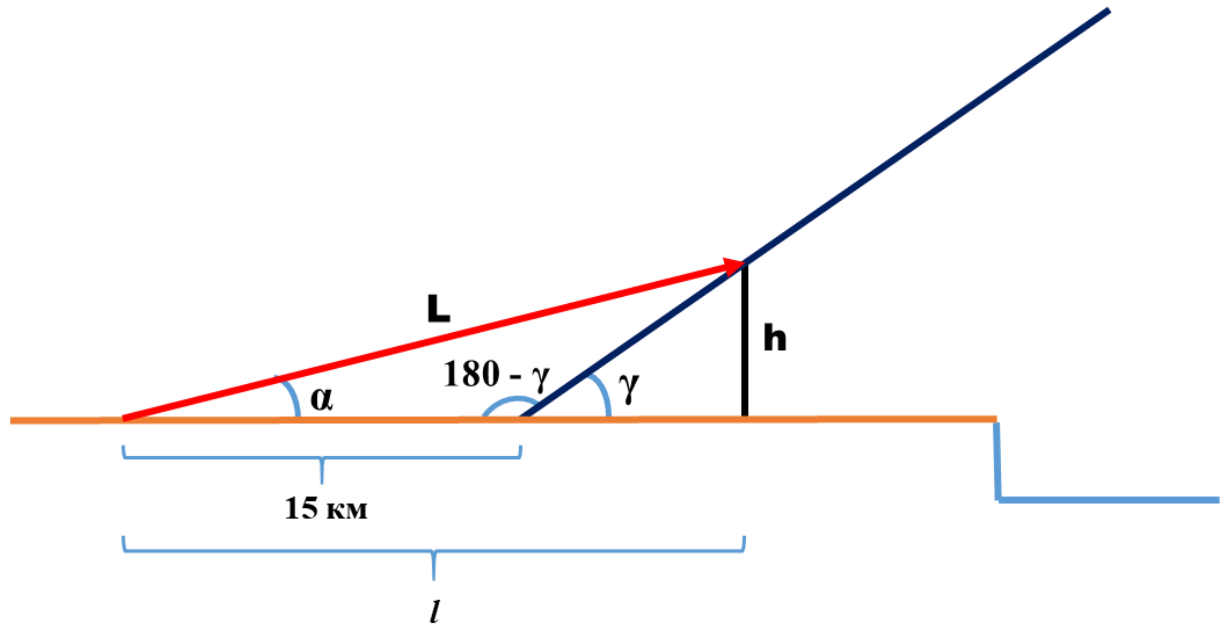


Рисунок 4.10 – Геометрия входа луча в клин. Здесь h – высота входа луча в клин; L – наклонная дальность луча; l – проекция наклонной дальности на горизонтальную ось.

По теореме синусов:

$$\frac{\sin(180 - \gamma)}{L} = \frac{\sin(180 - \gamma - \alpha)}{15} \quad (54)$$

Тогда наклонная дальность луча L будет определяться выражением:

$$L = \frac{15 \sin(180 - \gamma)}{\sin(180 - \gamma - \alpha)} \quad (55)$$

Высота входа луча в клин:

$$h = L \cdot \sin \alpha \quad (56)$$

Проекция наклонной дальности на землю:

$$l = L \cdot \cos \alpha \quad (57)$$

Для малых углов места радиолокатора высота прохождения луча над точкой начала клина находится в диапазоне 200 – 300 м. Учитывая высокие корреляционные связи коэффициента преломления по высоте, можно сказать, что в таких низких слоях коэффициент преломления практически не изменяется с высотой и, следовательно, луч распространяется прямолинейно до входа в клин.

Второй этап – расчет траектории луча, высоты его перехода в слоях равного содержания водяного пара и наклонной дальности (а также ее проекции) при прохождении радиолуча через клин призмы. В данном случае траекторию следует рассчитывать с учетом наклона линий равных значений коэффициента преломления. Такой учет выполняется посредством ввода в модель расчета для сферически слоистой атмосферы, подробно описанной во второй главе, значений углов наклона. Эти значения должны определяться с учетом высоты инверсии в каждом случае.

Третий этап – расчет траектории прохождения радиолуча через плоскопараллельный участок над озером. В таком случае расчет значительно упрощается, поскольку необходимость учитывать углы наклона линий равных значений автоматически отпадает.

3. Восстановление высотного распределения коэффициента преломления над озером. Построение траектории электромагнитной волны

Как уже было отмечено, над Ладожским озером в настоящее время отсутствуют наблюдения за высотными профилями метеорологических величин. Поэтому оценить реальный высотный ход коэффициента преломления не представляется возможным. Значит, для анализа условий возникновения сверхрефракции над акваторией озера, при которых береговая линия регистрируется локатором как цель, необходимо восстановить вертикальный профиль коэффициента преломления воздуха над поверхностью воды. Восстановление такого профиля позволит количественно оценить степень отклонения траектории радиоволн от траектории, соответствующей нормальной рефракции. Прогнозирование профиля коэффициента преломления с учётом его пространственной корреляции и специфики микроклимата над озером является ключевым этапом разработки методики учета рефракции радиоволн.

Необходимо отметить, что на высоте 0 м, то есть в приземном (или приводном) слое, значения коэффициента преломления будут существенно различаться над водой и над сушей, поскольку над водой, на границе раздела сред вода–воздух, значение парциального давления всегда равно давлению насыщения. Так происходит, поскольку водная поверхность обеспечивает неограниченный запас молекул воды, вследствие чего над водой запускается непрерывный процесс испарения молекул водяного пара с поверхности, и процессы испарения и конденсации быстро уравнивают друг друга. Над сушей же процесс испарения ограничен количеством воды, содержащимся в почве и растениях, поэтому парциальное давление водяного пара всегда ниже давления насыщения.

Известно, что с увеличением высоты парциальное давление водяного пара уменьшается. Для стандартной атмосферы закон распределения парциального давления описывается формулой Хргиана (формула 32) [8], которая показывает, что упомянутая величина экспоненциально уменьшается с высотой. Это связано с понижением температуры и давления атмосферного воздуха на больших высотах, что ограничивает способность воздуха удерживать влагу. Данная формула хорошо применима для слоев атмосферы, где температура изменяется плавно и нет резких скачков влажности. Однако, при наличии температурной инверсии в атмосфере, формула Хргиана неприменима, поскольку при инверсии температура растет с высотой или остается стабильной (изотермия), что может увеличить или стабилизировать влажность, вместо ее уменьшения. Это нарушает условия, при которых формула остается справедливой.

Для корректного восстановления высотного профиля коэффициента преломления над озером, необходимо прежде всего рассчитать значение коэффициента преломления на границе раздела сред вода–воздух. Оно рассчитывалось по формуле Фрума–Эссена (формула 7) с учетом того, что в этом слое значение парциального давления e равно давлению насыщения E , что обусловлено относительной влажностью, равной 100% над водной поверхностью, при определенной температуре воды. Для расчета использовались данные о высотном распределении атмосферного давления, полученные по результатам аэрологического зондирования атмосферы. Высотный профиль температуры над озером до нижней границы инверсионного слоя принимался линейно убывающим с градиентом $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, что соответствует влажноадиабатическому градиенту температуры [2].

Следует отметить, что в настоящее время срочные метеорологические наблюдения непосредственно на открытой поверхности воды Ладожского озера отсутствуют. Для расчета профиля коэффициента преломления доступна лишь информация о средней температуре поверхности воды за каждый месяц [40].

Например, известно, что средняя температура поверхности Ладожского озера в первые 2 недели сентября 2024 года составляла 20°C [40]. При этом давление насыщения, рассчитанное по формуле Магнуса $E = 23,38$ гПа, что эквивалентно парциальному давлению водяного пара e . Важно отметить, что при использовании такой модели для учета возможной сверхрефракции над озером в другие сезоны, необходимо использовать среднюю температуру поверхности воды Ладожского озера, соответствующую конкретному сезону. При использовании модели для учета над другими водоемами необходимо использовать высотные распределения метеорологических величин и данные о температуре водной поверхности, характерные для исследуемой местности.

В слоях атмосферы выше приводного реальное распределение коэффициента преломления имеет неизвестный характер. Поэтому представляется оправданным предположить (в качестве первого приближения) линейный ход изменения коэффициента преломления с высотой. Над Ладожским озером бризовая циркуляция в верхнем подинверсионном слое переносит сухой воздух с суши в сторону озера. Таким образом, значение коэффициента преломления в слое на нижней границе инверсии было установлено равным значению коэффициента преломления над сушей ($n = n'$ на рисунке 4.9). Затем восстанавливалось высотное распределение коэффициента преломления на расстоянии 35 км от точки начала клина призмы. Такое значение было выбрано, потому что на данном расстоянии уже находится водная поверхность озера, то есть высотный профиль коэффициента преломления, полученный таким образом, будет соответствовать распределению искомой величины над водой. Следует также отметить, что на данном расстоянии еще наблюдается высокая пространственная связь между значениями коэффициента преломления. При этом луч радиолокатора еще находится в низких слоях атмосферы, в которых, согласно исследованиям, выполненным в главе 2, наблюдаются наибольшие значения погрешностей, вызванные изменчивостью типов рефракции.

Прежде всего, значение коэффициента преломления над поверхностью суши в точке начала клина (точка n на рисунке 4.9) рассчитывалось по формуле 7 с учетом метеорологических параметров в точке расположения наземной метеорологической станции Воейково и его высокой корреляции по горизонтали. Как уже было упомянуто выше, значение коэффициента преломления на нижней границе инверсии будет соответствовать его значению в точке начала клина. Затем рассчитывалось значение коэффициента преломления на границе сред вода–воздух также по формуле Фрума–Эссена с использованием данных о средней температуре воды Ладожского озера за соответствующий сезон. Затем, в предположении того, что высотное распределение коэффициента преломления над поверхностью озера имеет линейный характер, восстанавливались значения коэффициента преломления по формуле:

$$n_h = n_b - kh, \quad (58)$$

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:

$$k = \frac{n_b - n'}{h_{\text{и}}}, \quad (59)$$

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

Далее с учетом всех введенных предположений восстанавливались профили коэффициента преломления над Ладожским озером. Затем с применением приемов элементарной геометрии, изложенных выше, рассчитывалась наклонная дальность луча в каждом слое, ее проекция на горизонтальную ось, а также высота перехода луча из одного слоя в другой. На

основе полученных данных строились траектория распространения луча в клине призмы над сушей и в самой призме над водой.

Выводы к четвертой главе

1. В условиях отсутствия прямых аэрологических измерений над водной поверхностью Ладожского озера разработана методика восстановления вертикального профиля коэффициента преломления радиоволн с использованием данных аэрологического зондирования над сушей и с учетом пространственной корреляции по горизонтали и вертикали. Эта методика позволяет количественно оценить отклонение траектории радиоволн от траектории, соответствующей нормальной рефракции, и выявить условия формирования сверхрефракции, ответственной за появление ложной цели на радиолокаторе.

2. Основное преимущество разработанной методики заключается в её универсальности и применимости для учета сверхрефракции радиоволн не только над Ладожским озером, но и над другими крупными водоемами с учётом локальных метеоусловий и особенностей микроклимата, что существенно расширяет потенциал радиолокационных исследований.

3. Разработанная методика может послужить основой для дальнейших исследований и совершенствования методов учета радиолокационных помех, связанных с явлениями рефракции, обеспечивая повышение надёжности работы систем радиолокационных наблюдений. Для практического применения методики рекомендуется внедрение регулярного мониторинга микроклимата прибрежных зон и проведение экспериментов по уточнению расстояния до начала клина призмы (влажного воздуха), а также плавности перехода между структурными элементами атмосферы над сушей и водой для повышения качества моделирования траекторий радиоволн.

ГЛАВА 5. АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ДЛЯ СЛУЧАЯ СВЕРХРЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН

В предыдущих главах работы было установлено, что при прогнозировании типа рефракции имеют место 4 случая – прогноз над сушей при стандартной стратификации метеопараметров; прогноз над сушей при инверсии температуры; прогноз над водой при стандартной стратификации; прогноз над водой при инверсии температуры. Анализ реальных данных показал, что для широты Санкт–Петербурга и Ленинградской области преобладающим типом рефракции является пониженная. В то же время, прогноз рефракции по разработанной методике также показал преобладание пониженной рефракции в первых трех случаях (суша с инверсией и без инверсии и вода без инверсии). Однако, при приподнятой инверсии температуры над Ладожским озером формируется сверхрефракция, которая фиксируется радиолокатором, расположенным в поселке Воейково. Для случаев сверхрефракции разработанный метод был дополнен моделью распространения радиолуча над водной поверхностью.

Оценить достоверность и оправдываемость прогноза по разработанному методу можно только для случаев сверхрефракции, поскольку именно для этих случаев точно известна высота радиолуча при достижении цели (земной поверхности), которая составляет 0 м, потому что именно в этом случае именно поверхность земли воспринимается радиолокатором как цель. Для всех остальных случаев истинная высота целей (облаков), для которых будут вводиться поправки на тип рефракции, неизвестна. Проверка метода для целей с заранее известными координатами могла бы быть реализована в рамках специального эксперимента с использованием точечной цели, например, беспилотного летательного аппарата, высота которого контролируется независимыми средствами позиционирования (например, системой GPS) и считается опорной. В этом случае результаты радиолокационных измерений

могут быть сопоставлены с опорными данными. Однако, проведение подобного эксперимента не представляется возможным.

По разработанной методике был проведен прогноз типа рефракции для всех месяцев 2024 года. Было установлено, что преобладающим типом рефракции является пониженная (256 случаев) и нормальная (95 случаев) как над водой, так и над сушей в условиях стандартной стратификации температуры и приземной инверсии. При этом следует отметить, что в данную статистику также включены случаи неустойчивой атмосферы, когда рефракция предполагалась равной средней для места установки лоатора, то есть пониженной.

Для летних месяцев 2024 года устойчивая атмосфера наблюдалась в некоторые дни второй половины августа и в первой половине сентября. За этот период было отмечено 14 приподнятых инверсий по данным аэрологического зондирования над сушей. Инверсии наблюдались 2, 4, 6 – 15, 17 и 25 сентября в 12 часов ВСВ.

В соответствие с выдвинутой ранее гипотезой, можно утверждать, что над акваторией Ладожского озера также наблюдались приподнятые инверсии. Для этих случаев был произведен расчет значений высотного распределения коэффициента преломления над поверхностью озера. Таким образом описывалась призматическая структура линий равных значений коэффициента преломления с учетом высоты температурной инверсии. Высота инверсии задавалась согласно данным аэрологического зондирования, и на ее основе рассчитывалось количество атмосферных слоев, с учетом того, что расстояние между двумя слоями составляет 100 м. Затем, с использованием восстановленных высотных профилей коэффициента преломления, рассчитывались траектории распространения радиолуча в призме. Следует еще раз подчеркнуть, что в случае отсутствия температурной инверсии, призма водяного пара над поверхностью озера не образуется, поэтому в таком случае тип рефракции над озером будет соответствовать типу рефракции над сушей, который можно учесть при

производстве наблюдений по методике, представленной в главе 3. Траектории радиолучей, рассчитанные для всех сроков, в которые наблюдались приподнятые инверсии, представлены на рисунке 5.1.

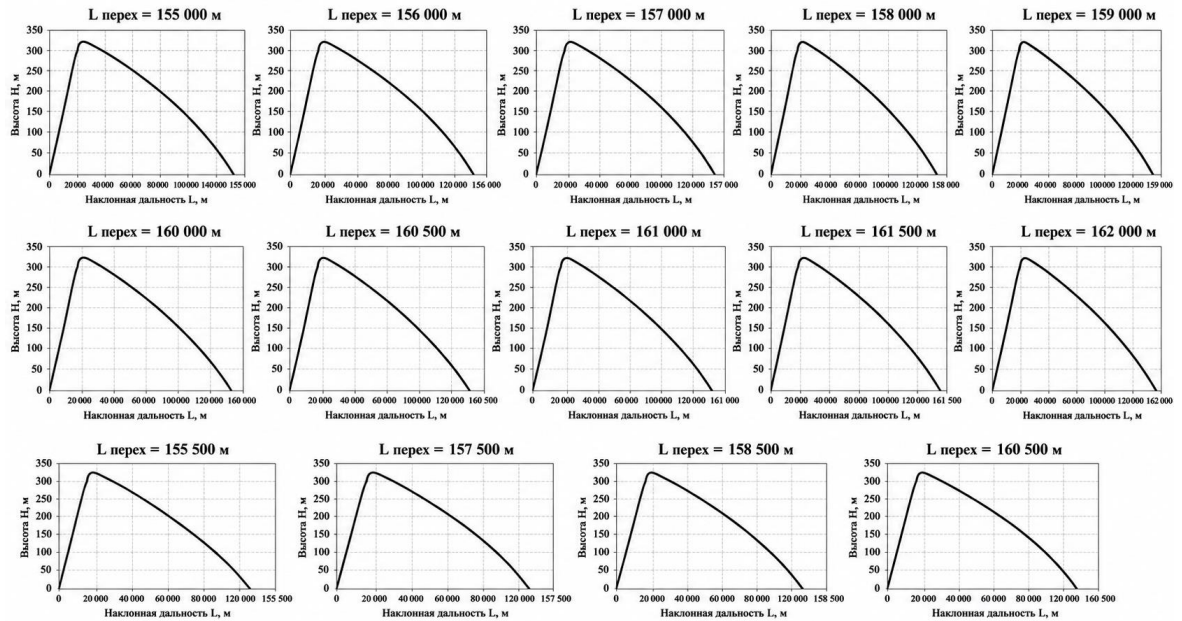


Рисунок 5.1 – Траектории распространения луча в призме над Ладожским озером

Анализируя рисунки, можно отметить, во-первых, нетипичную траекторию распространения луча, не похожую на привычные траектории, до этого представленные в настоящей работе. Видно, что во всех случаях на расстоянии около 30 км траектория претерпевает резкое преломление. Этот излом объясняется некоторой грубостью разработанной модели и вытекает из того факта, что автором было сделано предположение о резком, угловатом переходе клиновидной структуры линий равных значений коэффициента преломления над поверхностью земли к плоскопараллельной структуре над поверхностью воды. В действительности же такой переход, скорее всего, будет более плавным, однако, описать его не представляется возможным ввиду отсутствия реальных данных о

распределении метеовеличин и коэффициента преломления над Ладожским озером и вблизи него.

Тем не менее, можно сделать вывод о том, что луч преломляется над сушей, в клиновидной структуре призмы. Это можно утверждать, поскольку из рисунка также видно, что траектория радиолуча загибается вниз и достигает высоты 0 м при горизонтальной дальности в среднем около 169000 м (169 км). Здесь сразу следует отметить, что расстояние, на котором радиолокационный луч, согласно расчетам, упирается в землю, соответствует расстоянию от места установки локатора в поселке Воейково до северного берега Ладожского озера, которое составляет примерно 165 км. Расхождением, в среднем равным около 4 км, можно пренебречь, учитывая расширение радиолокационного луча по мере увеличения дальности от места установки локатора.

Можно также сделать вывод, что сверхрефракция радиоволн обусловлена искривлением луча в клиновидной структуре призмы, выдающейся на сушу и сформированной приподнятой температурной инверсией и распределением водяного пара, вызванным бризовой циркуляцией. Такое положение вещей приводит к отклонению траектории радиоволн вниз и ее достижению поверхности земли, что объясняет ложное отображение северного берега Ладожского озера на радиолокаторе.

Таким образом, согласно прогностическому расчету, во все сроки наблюдения приподнятой инверсии над озером радиолуч достигал высоты 0 м (упирался в землю). Следовательно, можно сделать вывод о том, что в указанные 14 сроков наблюдалась сверхрефракция. Такой результат согласуется с реальными данными о наличии сверхрефракции в сентябре 2024 года, которые подтверждаются радиолокационными картами, полученными с ДМРЛ–С Воейково. На рисунке 5.2 представлен фрагмент таблицы сопоставления реальных данных с данными прогноза, в которой случаи наличия

сверхрефракции по локатору и случаи прогноза сферхрефракции по разработанному методу, обозначены единицами.

Дата	UTC	Статус	Тип инверсии	Сверхрефракция (локатор)	Сверхрефракция (прогноз)
2024-09-01	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-01	12	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-02	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-02	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-03	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-03	12	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-04	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-04	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-05	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-05	12	ОК	Без инверсии	0	0
2024-09-06	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-06	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-07	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-07	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-08	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-08	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-09	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-09	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-10	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-10	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-11	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-11	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-12	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-12	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-13	00	ОК	Приземная инверсия	0	0
2024-09-13	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1
2024-09-14	00	ОК	Приподнятая инверсия	0	0
2024-09-14	12	ОК	Приподнятая инверсия	1	1

Рисунок 5.2. – Фрагмент реальных и прогностических данных о наличии сверхрефракции в сентябре 2024 года

Анализ таблицы показывает, что реальные прогностические данные о сверхрефракции согласуются с реальными.

На рисунке 5.3 представлена наглядна схема наблюдаемых и прогностических случаев.

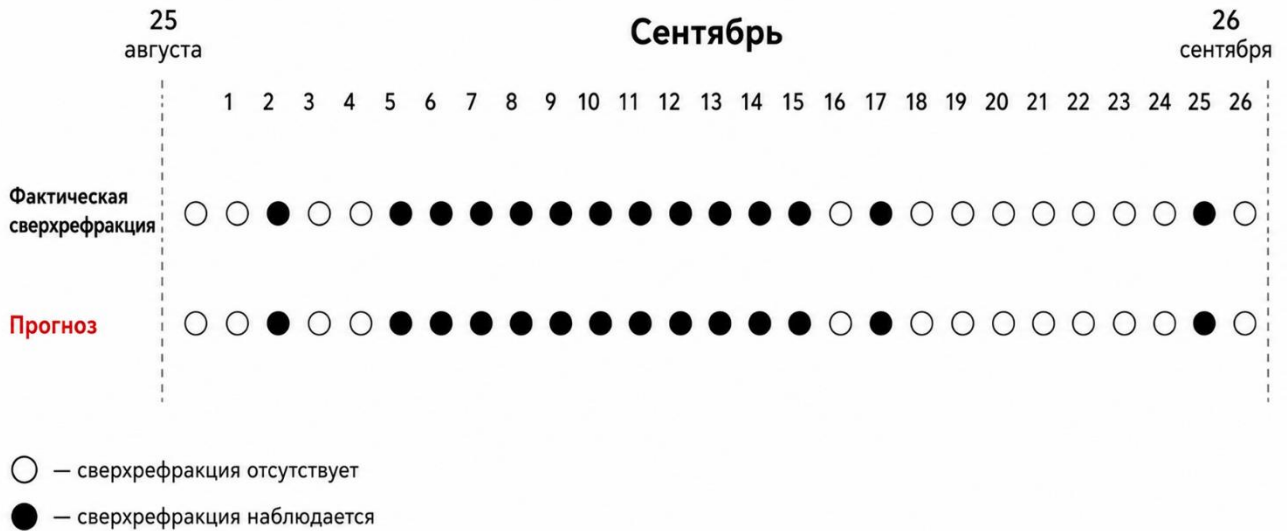


Рисунок 5.3 – Сопоставление прогнозируемых и фактических случаев сверхрефракции при апробации метода

В рамках исследуемой выборки для всех случаев сверхрефракции было получено полное соответствие между расчетными и фактическими данными. Таким образом, оправдываемость прогноза сверхрефракции по разработанному методу составила 100%. Установлено также, что модель восстановления профиля коэффициента преломления над озером удовлетворительно описывает реальные процессы, происходящие в атмосфере над водой.

Следовательно, разработанный метод позволяет анализировать и учитывать условия возникновения сверхрефракции радиоволн над крупными водоемами. Это имеет важное значение для повышения точности данных радиолокационных систем, особенно в прибрежных зонах, где сверхрефракция может создавать ложные цели. Метод может быть использован в радиолокационных исследованиях, а также для оценки влияния метеорологических условий на распространение радиоволн в различных географических зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача, связанная с исследованием влияния рефракции радиоволн на точность радиолокационных метеорологических наблюдений, разработкой моделей распространения электромагнитного излучения в неоднородной атмосфере и методов учета рефракции при обработке результатов радиолокационного зондирования.

В ходе выполнения работы проведён анализ влияния изменчивости метеорологических параметров атмосферы на распространение радиоволн и формирование погрешностей радиолокационных измерений. Показано, что значительные расхождения в определении координат и высот метеоявлений при наблюдении одних и тех же объектов различными радиолокаторами обусловлены преимущественно изменчивостью метеорологических условий и связанной с ними рефракцией радиоволн, тогда как влияние аппаратурных факторов носит вторичный характер.

Исследованы пространственные и высотные характеристики коэффициента преломления атмосферы. Установлено отсутствие значимых пространственных корреляционных связей коэффициента преломления на расстояниях порядка нескольких сотен километров, что свидетельствует о локальном характере условий возникновения различных типов рефракции и обосновывает необходимость индивидуального учета рефракции для каждого радиолокатора. Показано, что наибольший вклад в формирование погрешностей радиолокационных наблюдений вносят нижние слои атмосферы высотой до 1,5 км, где формируются наиболее значительные градиенты температуры и влажности воздуха.

Разработана аналитическая модель распространения электромагнитной волны в сферически–слоистой атмосфере, позволяющая количественно оценивать влияние вертикального профиля коэффициента преломления и его

градиента на траекторию радиолуча и точность определения координат целей. На основе выполненного моделирования показано, что использование стандартной атмосферы не позволяет адекватно описывать реальные условия распространения радиоволн, поскольку реальный профиль коэффициента преломления существенно изменяется в зависимости от текущего состояния атмосферы.

Исследовано влияние подстилающей поверхности на условия распространения радиоволн. Показано, что над крупными водными объектами формируются специфические условия распределения температуры и влажности воздуха, приводящие к изменению высотных профилей коэффициента преломления и его градиента. Установлено, что в условиях устойчивой стратификации атмосферы и наличия приподнятой температурной инверсии над водной поверхностью формируется призма, образованная линиями равных значений коэффициента преломления, в пределах которой происходит искривление траектории радиолуча по типу сверхрефракции.

На примере Ладожского озера предложено физическое объяснение механизма формирования сверхрефракции над обширными водными поверхностями. Показано, что необходимыми условиями возникновения сверхрефракции являются наличие приподнятой температурной инверсии, высокая влажность приземного слоя атмосферы и динамическая устойчивость воздушных масс, препятствующая вертикальному перемешиванию. Установлено, что отсутствие температурной инверсии приводит к разрушению призматической структуры распределения линий равных значений коэффициента преломления и исчезновению условий для возникновения сверхрефракции.

В диссертации разработан метод учета и прогноза рефракции радиоволн, основанный на использовании локальных метеорологических данных, результатов аэрологического зондирования и статистических характеристик распределения коэффициента преломления. Показано, что применение данного

подхода позволяет корректно описывать условия возникновения различных типов рефракции и учитывать их влияние при интерпретации радиолокационных наблюдений.

Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о том, что учет реального распределения метеорологических параметров и связанной с ними изменчивости коэффициента преломления является необходимым условием повышения точности радиолокационных измерений и корректной обработки радиолокационной информации. Выполненные исследования создают основу для дальнейшего развития методов прогноза и учета рефракции радиоволн в задачах радиолокационного зондирования атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ–С в синоптической практике. Третья редакция. Москва, 2019.
2. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы; – Л.: – Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
3. Бодунов Е. Н., Никитченко В. И., Петухов А. М. Базовый курс физики. – С–Пб.: Издательство ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020 – 319 с.
4. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Издание 4–е. – М.: Издательство «Связь», 1972 – 335 с.
5. Колосов М. А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса – М.: Издательство «Советское радио», 1976 – 218 с.
6. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии (Радиометеорология) – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 350 с.
7. Аренберг А. Г. Распространение дециметровых и сантиметровых волн – М.: Издательство «Советское радио», 1957 – 303 с.
8. Тверской П. Н. Курс метеорологии (Физика атмосферы); – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 700 с.
9. Жуков В. Ю., Кузнецов А. Д., Никитина В. С. Моделирование влияния рефракции на траекторию распространения радиоволн в атмосфере. Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы

дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Муром, 2023.

10. Жуков В. Ю., Щукин Г. Г. Распознавание опасных явлений погоды в современной метеорологической радиолокации. Материалы VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», изд. Военно-космической академии Можайского, Санкт-Петербург, 2020. С. 40–50.
11. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320–91. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 360 с.
12. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество. 2-е издание, перераб. и до. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 401 с.
13. Smith E. K., Weintraub S. The constant s in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. // *Proceedings of the institute of Radio Science*. 1953. Vol. 41. PP. 1035–1037.
14. Григоров Н. О., Саенко А. Г., Восканян К. Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. РГГМУ, С-Пб, 2012 г. – 306 с.
15. Восканян К. Л., Григоров Н. О., Никитина В. С. Инерционные погрешности и чувствительность метеорологических приборов. *European Journal of natural history*. 2020. №3. С. 109–114.
16. Григоров Н. О., Никитина В. С. Чувствительность и тепловая инерция актинометрических приборов. Сборник трудов III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». Санкт-Петербург, 2019. С. 243–246.
17. Григоров Н. О., Никитина В. С. Оценка точности измерения метеорологической дальности. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы

- развития гидрометеорологии в России, приуроченной к Году науки и технологий. Иркутск, 2021. С. 510–511.
18. A. M. Smith, Ptolemy's Theory of Visual Perception: An English Translation of the Optics (American Philosophical Society, Philadelphia, 1996), p. 19. This second century work was organized according to the three divisions.
 19. M. R. Cohen and I. E. Drabkin, A Source Book in Greek Science (Harvard University, Cambridge, Mass., 1958), p. 200.
 20. Waldemar H. Lehn and Siebren van der Werf. Atmospheric refraction: a history. Applied optics. / Vol. 44, No. 27 / 20 September 2005.
 21. Laplace P. S. Traite de mecanique c'eleste, v. 4, Paris, 1805.
 22. R. A. Watson Watt, J. F. Herd and F. E. Lutkin. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences Vol. 162, No. 909 (Sep. 15, 1937), pp. 267–291 (27 pages) Published By: Royal Society.
 23. R. A. Watson–Watt, L. H. Bainbridge–Bell, A. F. Wilkins, E. G. Bowen. Return of Radio Waves from the Middle Atmosphere. Nature vol. 137, page 866 (1936).
 24. R. A. Watson–Watt. The evolution of radiolocation. Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part IIIA: Radiolocation.
 25. Казанский К. В. Земная рефракция над обширными водными поверхностями. – Л.: Гидрометеиздат, 1966.
 26. Киселев В. Н., Кузнецов А. Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). РГГМУ, С–Пб, 2004. – 426 с.
 27. Лобанов В. А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. РГГМУ, С–Пб, 2016. – 332 с.
 28. Детков А. Н., Жеребцов С. И., Кобузов А. Н., Макаров И. А. Наведение радиолуча на цель с учетом рефракции в атмосфере Земли. Журнал радиоэлектроники №10, Москва, 2013.
 29. Акулиничев Ю. П., Новиков А. В. Модель пространственно–временного поля индекса преломления приземного слоя атмосферы. Электроника,

- измерительная техника, радиотехника и связь №1(21), часть 2, 2010. С. 36–44.
30. Базарова А. С., Базаров А. В., Кураков С. А., Атутов Е. Б., Сычев Р. С., Башкуев Ю. Б., Доржиева С. М. Суточная динамика градиента рефракции в нижнем десятиметровом слое приземной атмосферы. Вестник ПГТУ. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы №3(59), 2023. С. 21–32.
 31. Гомбоев Н. Ц., Батороев А. С. Горизонтальные связи показателя преломления воздуха и его вертикального градиента в Восточно–Сибирском регионе. Горный информационно–аналитический бюллетень (научно–технический журнал). – 2011. – № 5. – С. 362–365. – EDN ONBOED.
 32. Косцов В. С. Дистанционное комплексное определение вертикальных распределений параметров облачной атмосферы по ее собственному нисходящему радиотепловому излучению: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук. Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова. – Ленинград, 1988. – 16 с.
 33. Atmospheric soundings: [Электронный ресурс]. URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. (Дата обращения: 21.04.2022)
 34. В. В. Полякова, Н. В. Шаброва. Основы теории статистики: [учеб. пособие]; М–во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун–т. – 2–е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: Изд–во Урал. ун–та, 2015. – 148 с.
 35. Автоматические метеорологические станции: в 2 т. / К.Л. Восканян, А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова. — Ч. 1. Тактико–технические характеристики: учебное пособие. — СПб.: РГГМУ, 2016. — 170 с.
 36. Комплексы аэродромные метеорологические радиотелеметрические информационно–измерительные АМРИИК: [Электронный ресурс]. URL:

- <https://all-pribors.ru/opisanie/47167-11-amriik-49817>. (Дата обращения: 6.03.2025).
37. Профессиональная метеостанция Amtast AW006 с WiFi и возможностью передачи данных через Интернет на любой смартфон или компьютер через браузер: [Электронный ресурс]. URL: https://www.ecounit.ru/goods_3909.html. (Дата обращения: 6.03.2025).
38. Волков Е. А. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 248 с.
39. ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteo.nw.ru/>.
40. Температура поверхности воды Ладожского озера в 2024 году: [Электронный ресурс]. URL: <http://russia.pogoda360.ru/896153/july/>.
41. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб: Гидрометеоиздат, 1993, 356 с.
42. Ладога / Под ред. В. А. Румянцева, С. А. Кондратьева. — Санкт-Петербург: Издательство Института озероведения РАН, 2013. — 568 с.