

На правах рукописи

УДК 621.396.96: 537.874



**КИСЕЛЕВ ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ**

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ  
МЕЗОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТРОПОСФЕРЫ  
НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ И ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ  
ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Официальные оппоненты: **Дмитренко Анатолий Григорьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры исследования операций, Национальный исследовательский Томский государственный университет

**Майстренко Василий Андреевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой средств связи и информационной безопасности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

**Хуторова Ольга Германовна**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиоастрономии, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 31.10.2018 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на сайте ТУСУРа:

[https://postgraduate.tusur.ru/system/file\\_copies/files/000/000/874/original/диссертация-Киселев.pdf](https://postgraduate.tusur.ru/system/file_copies/files/000/000/874/original/диссертация-Киселев.pdf)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим выслать по адресу: 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.268.04 Акулиничеву Ю.П. e-mail: [aura1941@mail.ru](mailto:aura1941@mail.ru).

Автореферат разослан 30 июля 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.268.04  
доктор технических наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** При проектировании радиосистем местоопределения высокой инструментальной точности важнейшей задачей является уменьшение влияния ошибок измерений и искажений, возникающих из-за наличия атмосферных возмущений. За многие годы исследований были получены важные результаты, позволяющие существенно уменьшить ошибки радиоизмерений, вносимых крупными (синоптическими) неоднородностями и снизить негативное влияние случайных флуктуаций сигналов, возникающих из-за атмосферной турбулентности.

Но роль промежуточных метеорологических явлений и процессов, с масштабами от единиц до сотен километров, временем существования от десятков минут до нескольких часов, которые определяются как мезомасштабные (в радиофизических исследованиях – местные, локальные, крупномасштабные), до сих пор плохо изучена [1], хотя они порождают эффекты случайной рефракции, влияющей на все типы устройств, чувствительных к флуктуациям углов прихода, фазовым набегам, доплеровскому сдвигу, временной задержке. Такие возмущения постоянно присутствуют в атмосфере, но отсутствие данных о мезомасштабной структуре поля коэффициента преломления порождает проблемы расчета погрешностей радиосистем, хотя, как утверждается [2, 3], именно эти погрешности определяют их предельные точностные возможности. По оценке Куштина В.И. [4] «...существующие методы позволяют устранить только 40-50% ошибки за влияние тропосферы». Отсюда очевидна актуальность выявления разных видов мезомасштабных неоднородностей, создания их моделей и разработки мер по учету влияния на работу радиосистем.

**Степень научной проработанности темы.** До некоторого времени даже при разработке теоретических атмосферных моделей мезомасштабной составляющей пренебрегали, недооценивая важность таких явлений. Сейчас ситуация радикально изменилась. Активное и целенаправленное изучение метеорологами мезомасштабной составляющей структуры атмосферы позволило разработать модели мезомасштабного прогноза, внедренные в оперативную практику Росгидромета. Системы еще находятся в стадии тестовых испытаний, но уже сейчас позволяют оценить погодные условия на ограниченных участках территорий, включая регистрацию опасных атмосферных явлений, загрязнения воздуха и других данных, нужных для решения многих задач хозяйственной и научной деятельности.

Одной из таких задач является необходимость оперативного учета и прогноза характеристик среды распространения волн для обеспечения требуемой точности измерения пространственных координат радиотехническими средствами, для чего могут быть использованы методы краткосрочной мезомасштабной метеорологии, адаптированные к условиям и требованиям анализа влияния кратковременных вариаций метеопараметров на ошибки радиоизмерений.

В этом направлении за последних два десятилетия важные результаты, необходимые для оценки влияния мезомасштабных неоднородностей (ММН) на эффективность действия радиосистем диапазона УКВ, получены сотрудниками Казанского государственного университета (Тептин Г.М., Хуторова О.Г., Корчагин Г.Е., Журавлев А.А., Зинин Д.П. и др.). Были экспериментально исследованы мезомасштабные вариации коэффициента преломления, оценены их характерные размеры и временные периоды на всех высотных уровнях тропосферы. Установлен вклад мезомасштабных вариаций в дисперсию индекса преломления и их влияние на рефракцию радиоволн для различных углов места, выявлены дополнительные ошибки, вносимые в фазовые флуктуации; на основе численной метеорологической модели получена оценка мезомасштабной пространственно-временной изменчивости коэффициента преломления радиоволн, проверенная результатами натурных измерений. Исследования подтвердили также необходимость учета мезомасштабных вариаций коэффициента преломления при определении пространственных координат на космических трассах.

Сейчас при изучении распространения радиоволн стоит задача разработки радиофизических моделей мезомасштабных неоднородностей, так как именно их отсутствие приводит к тому, что «эффекты влияния на радиоволны крупномасштабных неоднородностей, размеры которых больше внешнего масштаба (турбулентности), анализировать затруднительно» [1]. Вполне очевидно, что выход из существующей ситуации только один – развитие радиофизических исследований по мезомасштабной тематике. Пока же изучение таких процессов в радиофизике ограничивается, в основном, регистрацией и анализом медленных флуктуаций параметров радиосигналов.

Для описания мезомасштабных неоднородностей пока не установлено каких-то общих закономерностей и моделей [5]. В разных условиях существуют разные механизмы их формирования с существенным различием свойств: они могут проявлять себя и как чисто случайные, и как детерминированные явления с характеристиками, существенно зависящими от погоды, времени года, климата, рельефа местности. Несмотря на эти трудности, создание моделей ведется. Например, для геодезии уже созданы модели, учитывающие горизонтальную изменчивость профиля коэффициента преломления в зависимости от типа подстилающей поверхности [6].

Однако полученные разными авторами результаты экспериментальных исследований изменчивости параметров радиосигналов, связанных с наличием в тропосфере мезомасштабных неоднородностей, чаще всего носят описательный, иллюстративный характер, эпизодичны и явно не пригодны для создания методик учета их влияния на работу радиосистем, что связано с недостатком объективных сведений о возмущениях метеорологических полей промежуточных масштабов.

Обзор и анализ известных научных результатов по теме диссертационной работы показывают, что изучаемая проблема еще не получила должного освещения в литературе и нуждается в дальнейшей разработке по ряду направлений:

- получение достоверных сведений о медленных и пространственно-протяженных изменениях радиометеорологических полей, выходящих за пределы высокочастотной части спектра флуктуаций коэффициента преломления;

- разработка моделей мезомасштабных тропосферных неоднородностей, что позволит создать методы оценки их влияния на тропосферные радиолинии;

- продолжение изучения низкочастотных флуктуаций сигналов на протяженных трассах для выявления факторов, определяющих характеристики сигналов;

- изучение связи характеристик медленных изменений параметров сигналов в разных климатических и географических условиях, особенно на трассах ДТР, для которых нет надежных теорий распространения радиоволн, с численными характеристиками радиометеорологической обстановки на радиотрассах;

- создание методик прогноза численных характеристик сигналов на коротких интервалах времени, основанных на использовании результатов оперативных измерений параметров внешней среды.

**Цель диссертационной работы.** Разработка методов оценки погрешностей измерения угловых координат и дальности действия систем радиомониторинга, обусловленных наличием в атмосфере мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления.

**Задачи проводимых исследований:**

- Исследование характеристик мезомасштабных неоднородностей тропосферы и создание их физико-статистических моделей.

- Оценка влияния мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления тропосферы на работу радиотехнических систем ультракоротких радиоволн на трассах разной протяженности.

- Экспериментальное и теоретическое изучение крупномасштабных (во времени и в пространстве) флуктуаций сигналов УКВ при распространении в тропосфере.

- Систематизация экспериментальных данных, полученных в разных условиях, позволяющая выявить общие закономерности изменений параметров сигналов в зависимости от дальности, изменчивости метеоусловий и других параметров.

- Разработка методов диагноза и прогноза величины угловых азимутальных ошибок на основе использования априорных и оперативных метеоданных.

- Разработка методов диагноза и прогноза величины множителя ослабления по априорным и оперативным данным для оценки дальности действия загоризонтных пассивных радиосистем определения местоположения источников радиоизлучений.

**Научная новизна проведенных исследований.**

1. Впервые показана возможность учета влияния на распространение УКВ мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления, возникающих в приземном слое атмосферы над участками местности с

разнообразными элементами ландшафта (лес, болото, луг и т.п.), и разработана радиометеорологическая модель таких неоднородностей.

2. Впервые экспериментально исследован и теоретически обоснован механизм формирования крупномасштабных пространственно-временных флуктуаций фазового фронта для случая распространения радиоволн над пересеченной местностью с разнообразными видами подстилающей поверхности.

3. Впервые разработана, на основе использования данных топографического описания местности, методика построения карт прогноза медленных флуктуационных ошибок измерения азимутальных углов, возникающих на наземных пересеченных трассах распространения радиоволн при различных метеорологических условиях.

4. Исследована модель механизма формирования электромагнитного поля УКВ за радиогоризонтом, построенная на основе гипотезы о наличии в тропосфере объемных мезомасштабных неоднородностей с квазиплоскими границами (слоями), произвольно наклоненными к горизонту и отражающими радиоволны, которая позволила понять природу ранее не объясненных эффектов при дальнем тропосферном распространении.

5. На основании многолетних радиометеорологических исследований, выполненных в акватории Тихого океана, получены статистически достоверные данные о пространственно-временной структуре электромагнитного поля УКВ на морских трассах и ее изменчивости в зависимости от времени года и района океана.

6. Определена дистанционная зависимость медленных флуктуаций азимутальных углов прихода для трасс длиной от 20 до 500 км по данным натурных опытов в разных регионах РФ и акватории Тихого океана, подтвержденная модельными опытами.

7. Впервые предложена и экспериментально проверена на трассах ДТР в акватории Тихого океана многофакторная модель оценки величины множителя ослабления, основанная на расчете отклонений от норм, позволяющая, в отличие от ранее применяемых методик расчета среднемесячных значений, рассчитывать среднечасовые величины множителя; на базе этой модели, с использованием априорных сведений о среднем уровне сигнала в зависимости от времени года и района океана, созданы методики прогноза и диагноза дальности действия загоризонтных тропосферных РТС по данным метеорологических и аэрологических измерений.

**Теоретическая значимость результатов.** Результаты работы позволили обосновать новые теоретические концепции и идеи, которые ранее не использовались в сфере радиофизических исследований, направленные на изучение возможностей улучшения ТТХ характеристик пассивных радиосистем. Предложено учитывать еще один класс атмосферных неоднородностей – мезомасштабных, наличие которых подтверждается результатами радиофизических и метеорологических измерений. Предложен метод учета физико-метеорологических свойств подстилающей поверхности и ее параметров (тепловой поток, затраты тепла на испарение). Полученные

результаты служат теоретической базой для создания методов оценки точности угловых измерений координат ИРИ на наземных трассах с пересеченным рельефом.

В работе впервые проверена гипотеза о механизме формирования структуры электромагнитного поля за радиогоризонтом за счет квазизеркального отражения от случайных тропосферных мезомасштабных слоев с большим наклоном; правомерность гипотезы подтверждена модельными экспериментами, результаты которых согласуются с данными натуральных радиофизических опытов. Полученные данные позволяют говорить о возможности создания теории ДТР, обобщающей все имеющиеся знания об этом явлении.

Впервые для радиометеорологических исследований использован метод расчета характеристик сигналов в отклонениях от среднего, что послужило теоретической базой для создания оперативной методики определения дальности максимального обнаружения ИРИ.

### **Практическая значимость результатов и рекомендации по использованию научных выводов.**

1. Разработана методика расчета азимутальных ошибок радиосистем, обусловленных горизонтальной случайной рефракцией на сухопутных трассах, основанная на использовании топографического описания местности и данных о ветре, позволяющая создать карты погрешностей пеленгования источников излучения.

2. Установлен вид дистанционной зависимости величины низкочастотных составляющих азимутальных ошибок при распространении УКВ-сигналов в тропосфере на трассах протяженностью до 500 км; показано, что на расстояниях более 100 км вклад крупномасштабных флуктуаций азимутальных углов прихода в общую ошибку измерений направления на источник радиоизлучений может быть преобладающим.

3. Разработана методика оценки среднемесячной величины множителя ослабления в зоне ДТР в виде суммы стандартной функции ослабления и районно-сезонных отклонений от нее, уменьшающая погрешность расчетов, связанную с наличием годовых циклов радиометеорологических процессов, которую можно использовать для перспективного планирования работы радиоэлектронных средств в заданном регионе; материалы методики представлены в радиоклиматическом атласе Тихого океана, созданном в качестве справочного пособия для анализа условий распространения радиоволн УКВ-диапазона в тропосфере над морской поверхностью.

4. Разработана методика диагноза среднечасовых значений множителя ослабления, основанная на применении многофакторного регрессионного уравнения в отклонениях от норм, дающая зависимость множителя от набора получаемых на корабле метеопараметров при использовании в качестве норм априорных данных, включенных в Радиоклиматический тропосферный атлас Тихого океана.

5. Разработан и проверен по опытным данным программно-аппаратный макет системы прогноза и диагноза дальности действия пассивных

тропосферных РТС местоопределения источников радиоизлучения на морской поверхности, в котором используются методики прогноза среднемесячной и среднечасовой величин множителя ослабления в зоне ДТР.

Разработанные методики предназначены для использования при проектировании пассивных тропосферных систем местоопределения и в процессе их эксплуатации; результаты исследований используются в учебном процессе.

### **Методы исследований и достоверность результатов.**

Работа основана на результатах многолетних экспериментальных исследований на сухопутных и морских трассах, подтверждающих полученные автором теоретические и модельные данные о характеристиках поля УКВ. Расчеты выполнены с применением статистических методов, включая проверку достоверности на основе оценки доверительных вероятностей и критериев согласия. При наличии нестационарности исследуемых случайных процессов, наряду с корреляционными применялись методы структурного анализа. Выдвинутые гипотезы о природе формирования пространственно-временной структуры ЭМП на тропосферных трассах распространения радиоволн обоснованы и подтверждены теоретическими и экспериментальными исследованиями автора и работами других исследователей. Модель мезомасштабных неоднородностей в приземном слое атмосферы, полученная при использовании методов математической физики, подтверждена экспериментально; гипотеза о наличии отражений от наклоненных слоев при ДТР подтверждена результатами имитационного моделирования, которые не противоречат данным, полученным в натурных экспериментах. Наличие статистической связи между параметрами метеополей и радиосигналов доказано методами регрессионного анализа.

**Личный вклад автора.** В работе представлены результаты многолетних исследований, выполненных самим автором, под его руководством и при непосредственном участии. Автором поставлена и обоснована идея необходимости учета влияния мезомасштабных неоднородностей атмосферы на точность радиоизмерений, разработаны теоретические положения для подтверждения этого тезиса. Экспериментальное изучение случайной рефракции на наземных трассах выполнено на аппаратуре, созданной при участии автора. Под его руководством и личном участии обработаны результаты опытов, проверено соответствие теории и эксперимента. Автором разработана модель мезомасштабных неоднородностей, определяющих закономерности случайной рефракции радиоволн в приземном слое атмосферы, создана методика оценки ошибок измерения азимута на основе использования топографических карт. Представлена и обоснована гипотеза, объясняющая механизм возникновения медленных флуктуаций азимутальных углов прихода при ДТР за счет квазизеркальных отражений от мезомасштабных атмосферных неоднородностей. Автор предложил применить в радиофизических исследованиях известный в метеорологии способ обработки данных в отклонениях от норм вместо применяемого ранее анализа абсолютных величин. Это позволило использовать результаты многолетних экспериментов,

выполненных коллективом сотрудников НИИ РТС при непосредственном участии автора, для создания методики оперативной оценки среднечасовых величин множителя ослабления на морских трассах. Экспериментальная проверка этой методики выполнена под руководством и при непосредственном авторском участии. Автор сформулировал все выводы и научные положения настоящей работы.

**Основные научные положения, выносимые на защиту.**

1. Для уменьшения ошибок радиоизмерений, возникающих из-за наличия атмосферных возмущений, необходимо изучать явления и процессы с масштабами от единиц до сотен километров, временем существования от десятка минут до нескольких часов, которые определяются как мезомасштабные и до сих пор плохо изучены с точки зрения их воздействия на работу измерительных радиосистем, хотя они порождают радиофизические эффекты, влияющие на все типы устройств, чувствительных к флуктуациям углов прихода, фазовым набегам, доплеровскому сдвигу, временной задержке.

2. На сухопутных трассах распространения радиоволн медленные изменения характеристик принимаемых сигналов зависят от влияния мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления, формирующихся в приземном слое атмосферы из-за наличия на подстилающей поверхности локальных участков, различающихся по температуре и влажности. Радиофизические характеристики таких неоднородностей определяются физико-статистической моделью, параметры которой связаны с физическими свойствами земной поверхности и изменениями метеоусловий. Перепад текущих значений индекса преломления над отличающимися по свойствам участками в летний период в 2% случаев превышает 24 N-ед. при средней величине их среднеквадратичного отклонения (СКО) 5,2 N-ед.

3. Основным механизмом формирования крупномасштабной азимутальной структуры фазового фронта при распространении ультракоротких волн на наземных трассах является случайная горизонтальная рефракция, обусловленная распространением радиоволн в среде с мезомасштабными неоднородностями приземного слоя атмосферы.

4. Существенным фактором формирования структуры крупномасштабных вариаций фазового фронта УКВ за радиогоризонтом является наличие в объеме рассеяния мезомасштабных неоднородностей со случайно наклоненными к горизонту границами, отражающими радиоволны.

5. Методика, основанная на использовании данных, снятых с топографических карт, позволяет учесть влияние мезомасштабных неоднородностей приземного слоя атмосферы на величину погрешности измерения азимутальных углов на сухопутных трассах распространения ультракоротких волн и представить количественную оценку их влияния в виде карты поля ошибок.

6. Региональная методика оценки медианного значения множителя ослабления сигналов ДТР, принимаемых корабельными и береговыми радиосистемами, реализованная в форме карт радиоклиматического

тропосферного атласа, обеспечивает возможность перспективного планирования работы РТС в заданных районах акватории Тихого океана.

7. Радиометеорологическая методика оперативной оценки величины множителя ослабления на морских трассах дальнего тропосферного распространения, исключая влияние годовых циклических изменений используемых параметров на основе учета их априорно известных среднемесячных значений и многофакторного регрессионного уравнения с экспериментально определенными коэффициентами регрессии, обеспечивает среднечасовой статистический прогноз ослабления УКВ сигнала по оперативно измеряемым метеоданным со среднеквадратической ошибкой, лежащей в интервале от 7–11 до 4–5,5 дБ в зависимости от числа учитываемых метеопараметров.

**Апробация результатов работы.** Результаты исследований докладывались на всесоюзных, российских и международных конференциях, межведомственных и отраслевых совещаниях по распространению ультракоротких радиоволн, представлены в журналах «Изв. вузов. Радиофизика», «Изв. вузов. Радиоэлектроника», «Изв. вузов. Физика», «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», «Электросвязь», «Радиотехника», «Радиотехника и электроника», «Успехи современной радиоэлектроники», «Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники», сборниках тезисов и докладов.

Результаты исследований изложены в двух монографиях и Радиоклиматическом тропосферном атласе Тихого океана.

Основные результаты работы приведены также в ряде отчетов по НИР, выполненных по решению Правительства. Разработанные методики предназначены для использования при проектировании пассивных тропосферных систем местоопределения и в процессе их эксплуатации; результаты исследований использованы в учебном процессе.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения и списка литературы (299 источников), содержит 293 страницы текста и таблиц, 137 иллюстраций, 7 страниц приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана необходимость изучения атмосферных мезомасштабных неоднородностей и оценки их влияния на тактические характеристики радиосистем местоопределения. Указано на недостаток знаний об атмосферных явлениях с пространственным масштабом от единиц до сотен километров и временными изменениями десятки минут – десятки часов. Обоснована актуальность изучения таких явлений и процессов.

В **первой главе** представлен анализ опубликованных в литературе данных о мезомасштабных неоднородностях (ММН) атмосферы, выполнена качественная и количественная оценка их влияния на работу радиосистем и результаты измерений угловых и линейных координат радиолокационных целей, обоснована необходимость разработки методов уменьшения ошибок,

возникающих из-за наличия в атмосфере таких возмущений коэффициента преломления.

Результаты изучения атмосферных неоднородностей, представленные в виде их энергетических спектров (рисунок 1), показывали малость мезомасштабных флуктуаций по сравнению с синоптическими и турбулентными. Но другой результат был получен при изучении пространственно-временного спектра флуктуаций индекса преломления. Рисунок 2 демонстрирует отсутствие мезомасштабного минимума, который следовало бы ожидать, исходя из данных рисунка 1. Наличие существенных мезомасштабных флуктуаций было зафиксировано и при изучении угловых ошибок радиолокационных измерений, и при регистрации уровней сигналов за радиогоризонтом, что объяснялось наличием в атмосфере крупных неоднородностей (по терминологии метеорологов – мезомасштабных), которые до сих пор недостаточно изучены.

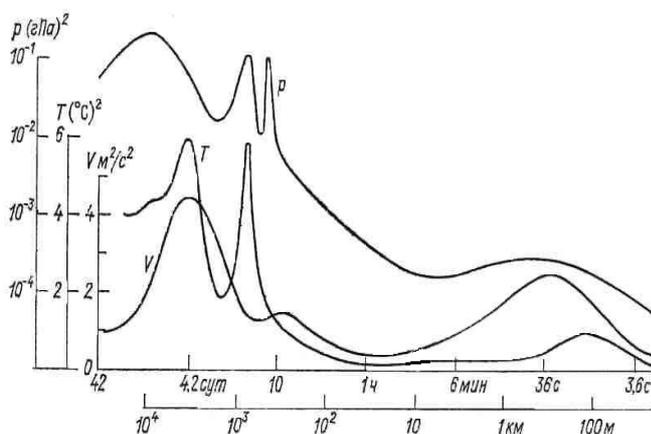


Рисунок 1 – Временные спектры метеорологических величин

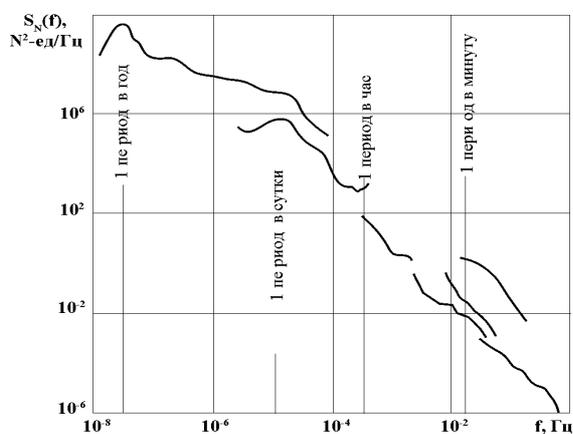


Рисунок 2 – Пространственно-временной спектр индекса преломления

Существенные качественные отличия спектров, результаты которых представлены на рисунках, объясняются отличием методов регистрации флуктуаций метеовеличин, использованных в разных опытах. Температура, ветер и давление измерялись в одной точке, что позволило зафиксировать лишь временные вариации метеовеличин на измерительной площадке. Данные об индексе преломления получены по результатам пространственно-временных радиоизмерений параметров атмосферы в объеме между передатчиком и приемником, разнесенных в разных циклах этого эксперимента на расстояния до 25 км, что обеспечило регистрацию пространственных атмосферных явлений, которые в разных местах трассы распространения радиоволн проявляются в виде мезомасштабных возмущений.

Таким образом, спектры рисунка 1 отражают структуры, которые возникают как промежуточные образования при распаде синоптических неоднородностей в процессе передачи их энергии в область микротурбулентности. В спектре рисунка 2 включены не только мезомасштабные неоднородности (ММН), возникающие в процессе эволюции

неустойчивых воздушных течений, но и те, которые генерируются за счет наличия на земной поверхности участков с разными физико-метеорологическими свойствами и разнообразными неровностями. Такие неоднородности показаны на рисунке 3, где приведен пример локальных возмущений поля температуры у поверхности земли, возникающих из-за разного нагрева отдельных ее участков. Это лишь одна из разновидностей мезомасштабных образований.

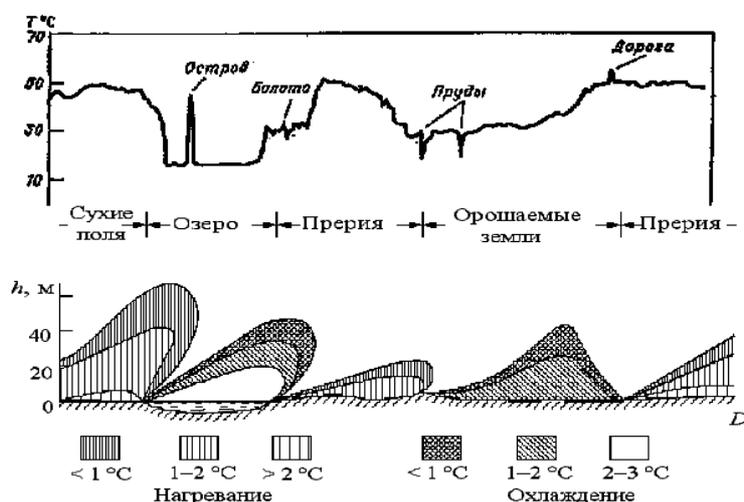


Рисунок 3 – Формирование неоднородностей над земной поверхностью

флуктуационные характеристики тропосферных радиосигналов, являются объемные и слоистые неоднородности, которые гораздо более разнообразны по своей природе и пространственной ориентации, чем привычное представление о них как о плоских горизонтально ориентированных образованиях. Обобщение данных о результатах измерений характеристик наклонных отражающих слоев показывает, что они существуют в тропосфере с величиной наклона до  $10^\circ$  и более. Естественно, что увеличение наклона слоев, переотражающих радиоволны за горизонт, приведет к увеличению угловых ошибок радиосистем, что и наблюдается в действительности.

Предположения, что основной вклад в формирование поля УКВ в зоне ДТР вносят мезомасштабные неоднородности с наличием наклонных переотражающих поверхностей, уже высказывались при обсуждении опытов по изучению сигналов, принимаемых далеко за радиогоризонтом. Использование гипотезы об определяющей роли мезомасштабных отражающих слоев с произвольным их пространственным наклоном позволило бы объяснить многие закономерности флуктуаций загоризонтных сигналов.

**Вторая глава** посвящена изучению характеристик крупномасштабных неоднородностей коэффициента преломления тропосферы на разных трассах распространения радиоволн. Их формирование в приземном слое (ПС) атмосферы над сушей связано с наличием на поверхности участков, заметно различающихся по физико-метеорологическим свойствам. Такие участки в разной степени нагреты (что определяется разностью величин радиационного баланса  $\Delta R$ ), испаряют разное количество влаги (определяется различием

Ошибки измерений азимута за счет таких ММН будут больше, чем ожидается только от мелкомасштабных атмосферных флуктуаций. Для уменьшения таких ошибок методами усреднения требуются пространственно-временные разности, соизмеримые с размерами и временем жизни таких неоднородностей.

Другой разновидностью ММН, существенно влияющих на

величин затрат тепла на испарение  $\Delta LE$ ). На рисунке 4 представлена схема формирования неоднородностей поля температуры в ПС над участками с разным нагревом. Аналогичные неоднородности формируются в поле влажности над участками с разным увлажнением. В результате в приземном слое существуют мезомасштабные флуктуации коэффициента преломления, дисперсия которых на высоте  $z$  определена выражением

$$\sigma_{\Delta n}^2 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \frac{\gamma}{\eta}(z) \right]^2 \cdot (\sigma_{\Delta R}^2 + 0,83\sigma_{\Delta LE}^2), \quad (1)$$

где первый множитель определяет вертикальную структуру неоднородностей, которая зависит от размеров участков и ветра, а второй определяет величину флуктуаций нагрева и испарения у подстилающей поверхности.

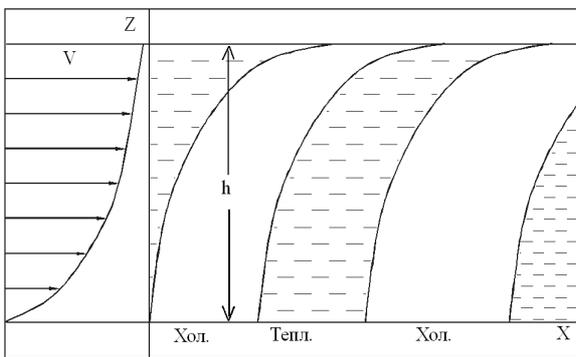


Рисунок 4 – Схема формирования неоднородностей в приземном слое

Расчет величины  $\sigma_{\Delta n}^2$  производится при наличии топографической карты, позволяющей определить размеры разных ландшафтных зон, рассчитать перепады их метеорологических характеристик ( $\Delta R$  и  $\Delta LE$ ). Выполненная экспериментальная проверка зависимости характеристик пространственных мезомасштабных неоднородностей в ПС от характеристик подстилающей поверхности и

метеорологических условий подтвердила правомерность использования предложенной модели.

В тропосфере над морем тоже формируются неоднородности над температурными «пятнами», создаваемыми циркуляционными потоками разной температуры внутри водной толщи. Характеристики таких неоднородностей индекса преломления изучены как по результатам обработки специально организованных экспедиционных аэрологических измерений (1971–1987 гг.) в акватории Тихого океана, так и по данным полигонных измерений международной программы «АМТЕХ-75» (Восточно-Китайское и Филиппинское моря), а также по данным измерений над Атлантическим океаном, опубликованным в литературе. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод, что над морями и открытым океаном постоянно существуют крупномасштабные неоднородности поля индекса преломления, наличие которых определяется синоптическими и мезомасштабными процессами со средними пространственными размерами соответственно 2000 и 200 км.

По материалам измерений программы «АМТЕХ-75» изучена одна из разновидностей ММН – слоистые образования и, в частности, наличие наклонов отражающих поверхностей слоев. Систематизированы также имеющиеся в литературе данные о наличии в атмосфере наклонных

отражающих слоев; их наклон относительно поверхности земли может составлять величину порядка десяти градусов и более.

В **третьей главе** представлены теоретические результаты решения задачи оценки флуктуаций азимутальных углов прихода, возникающих из-за влияния тропосферных ММН при разных механизмах распространения радиоволн. Для трасс в пределах прямой видимости и дифракционной зоны получена формула для расчета дисперсии флуктуации углов прихода, возникающих из-за наличия в ПС местных возмущений коэффициента преломления

$$\sigma_{\Delta\alpha}^2 = 1,2 \cdot \sigma_{\Delta n}^2 \cdot \frac{D}{a}, \quad (2)$$

где  $D$  – длина трассы;  $a$  – характерный размер неоднородностей коэффициента преломления ПС; параметр  $a$  был определен по топографической карте и равен 4,2 км. Теоретическая зависимость СКО флуктуаций угла прихода от дистанции  $D$  была рассчитана для различных метеорологических условий (погоде безветренной, со слабым ветром и с сильным ветром). Для метеорологических данных использовались их летние климатические значения для районов юга Западной Сибири. По результатам этой части работы определена последовательность выполнения оценки дисперсии флуктуаций углов прихода за счет влияния мезомасштабных неоднородностей, сформировавшихся в приземном слое атмосферы над поверхностью с участками разных ландшафтов.

При случайной рефракции помимо угловых поворотов луча происходит его случайное пространственное смещение от первоначального направления. Этот эффект, рассматриваемый в рамках модели случайных перемещений зоны Френеля над экраном с неровной верхней кромкой, позволил оценить величину медленных пространственно-временных флуктуаций фазы  $\varphi$  при распространении радиоволн в ПС над неровной местностью. При малых, относительно среднего положения, смещениях луча  $\Delta x$  и малых отклонениях высоты неровностей  $h(x)$  от его среднего уровня дисперсия флуктуаций фазы  $\sigma_{\varphi}^2$  зависит от высоты неровностей, величины горизонтального смещения луча, радиуса первой зоны Френеля  $b$ , множителя ослабления экрана  $F$ , характерного размера неровностей кромки экрана  $l_0$  и равна

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\sigma_h^2 \sigma_{\Delta x}^2}{b^4 F^2 l_0^2}. \quad (3)$$

При распространении радиоволн над пересеченной местностью с разнообразными ландшафтами для разности фаз  $\Delta\varphi$  на выходе горизонтально разнесенных на величину  $d$  антенн имеем оценку величины дисперсии флуктуаций  $\sigma_{\Delta\varphi}^2$  как результат совместного воздействия двух механизмов, влияющих на медленные фазовые вариации УКВ в приземном слое атмосферы. Принимая фазу поля в точке приема как сумму медленно меняющейся крупномасштабной составляющей  $\varphi_{\alpha}$  и составляющей  $\varphi$ , получим структурную функцию разности фаз в виде

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 = 2\sigma_{\varphi}^2 \left[ 1 - \exp\left(\frac{d^2}{d_0^2}\right) \right] + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \sigma_{\Delta\alpha}^2 \cdot d^2, \quad (4)$$

здесь  $\sigma_{\varphi}$  – СКО флуктуаций фазы;  $d_0$  – их радиус корреляций.

В полученном выражении первый член правой части описывает флуктуационную составляющую медленных вариаций структуры поля в предположении гауссовской корреляционной функции неровностей земной поверхности; второй – рефракционные флуктуации угла прихода  $\sigma_{\Delta\alpha}$ , определяемые ММН вблизи земной поверхности. На трассах загоризонтного распространения УКВ регистрируются медленные и крупномасштабные флуктуации горизонтального угла прихода, которые невозможно объяснить наличием случайной рефракции. На границе смены механизмов распространения (переход от зоны дифракции к зоне ДТР) СКО углов прихода возрастают на порядок и более. Такие эффекты в представленной работе объясняются переизлучением радиоволн мезомасштабными слоистыми неоднородностями при наличии наклона их отражающих поверхностей. Расчет величины отклонений угла прихода в точке приема выполнен в соответствии с подходом, предложенным Госсардом, когда задаются угол наклона слоя  $\beta$  и его ориентация относительно плоскости большого круга (ПБК), вертикальный и горизонтальный углы выхода луча от передатчика. Так как предложенная Госсардом система уравнений дает описание зависимости величин углов прихода от указанных параметров, но не позволяет получить аналитическую зависимость для расчета величины углов прихода от параметров слоя, задача решена путем проведения численного имитационного эксперимента. По данным таких опытов выполнена оценка характеристик медленных флуктуаций азимутальных углов прихода при заданных параметрах трассы, свойствах слоев и метеорологических условиях. На рисунке 5 представлены результаты расчета дистанционной зависимости  $\sigma_{\Delta\alpha}$  за радиогоризонтом при отражении от наклонных ( $\sigma_{\beta} = 6^\circ$ ) слоистых неоднородностей; на рисунке 6 приведена зависимость диапазона вариаций угла  $\alpha$  от величины  $a_{\text{ЭКВ}}$ , где  $\zeta = \alpha_{\text{max}}/\alpha_{\text{min}}$  для каждого конкретного значения  $a_{\text{ЭКВ}}$ .

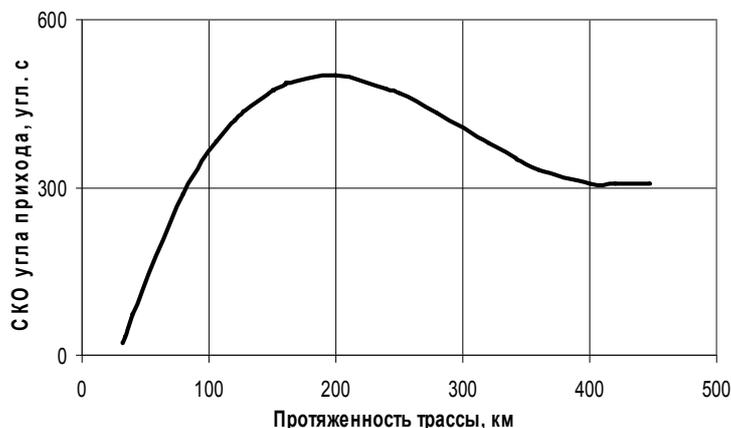


Рисунок 5 – Дистанционная зависимость  $\sigma_{\Delta\alpha}$  за радиогоризонтом

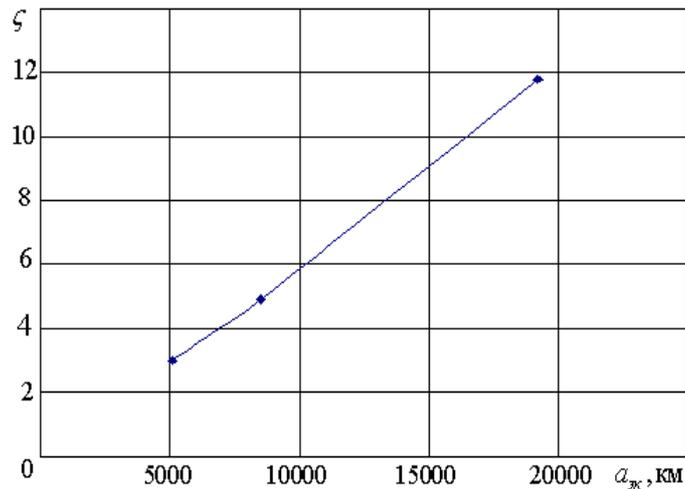


Рисунок 6 – Зависимость диапазона вариаций угла  $\alpha$  от величины  $a_{\text{экв}}$

В четвертой главе дано описание условий проведения экспериментальных исследований ТУСУР в области радиолокации и распространения радиоволн, которые были выполнены в период с 1963 г. по 1994 г. и включали четыре этапа. На первом этапе (1963–1965 гг.) изучалась структура электромагнитного поля в южных районах Западной Сибири на сухопутных трассах с пересеченным рельефом протяженностью от 21 до 103 км, т.е. в пределах зоны приема прямого и дифрагированного сигнала; в этом же районе в 1965–1965 г.г. продолжались исследования в ближней зоне ДТР на трассах 86–182 км. Изучение закономерностей распространения радиоволн над морской поверхностью началось в 1972 г. над акваторией Каспийского моря. Основная часть экспериментов, результаты которых использованы в настоящей диссертационной работе, выполнена в различных районах акватории Тихого океана с 1978 по 1994 г. на стационарных трассах Охотского моря и маневренных трассах прибрежных морей и открытого океана.

Экспериментальные исследования закономерностей распространения радиоволн на сухопутных и морских трассах позволили получить сведения о крупномасштабных флуктуациях параметров сигналов УКВ в зависимости от различных метеорологических условий и типов подстилающей поверхности и оценить влияние мезомасштабных неоднородностей на точность местоопределения источников излучения, создать методику диагноза предельной дальности загоризонтных РТС.

Результаты измерений фазовой структуры и флуктуаций углов прихода УКВ на трассах протяженностью от 20 до 500 км обсуждаются в пятой главе в рамках рассмотренных теоретических моделей медленных и крупномасштабных вариаций параметров поля с учетом влияния метеорологических условий, определяющих формирование мезомасштабных неоднородностей разной интенсивности и природы. При распространении радиоволн (РРВ) в пределах зон прямой видимости и дифракции ( $D = 20 \dots 103$  км) флуктуации разности фаз определяются, согласно (4), искажениями фазового фронта за счет случайной рефракции и рассеянием неровностями рельефа. На рисунке 7 представлены два образца структурных

функций разности фаз по данным опытов на трассе длиной 25 км, проведенных в разных метеоусловиях. Показателем влияния погоды на разность фаз  $\Delta\varphi$  взят параметр  $\sqrt{\Delta N^2}$ , где  $\Delta N = N_1 - N_2$  величина, пропорциональная горизонтальному градиенту индекса преломления между точками 1 и 2, расположенными у трассы РРВ. Сводные данные о флуктуациях угла прихода для всей совокупности опытов, выполненных на трассах длиной до 103 км, приведены на рисунке 8, где сплошные линии построены по теоретическим зависимостям для трех значений скорости ветра (1 – без ветра, 2 – со слабым ветром и 3 – с сильным ветром), а точки – измеренные величины СКО угла прихода.

Для опытов, обеспеченных требуемым объемом метеоизмерений, получено совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Показана возможность расчета СКО медленных флуктуаций угла прихода на приземных трассах с использованием топографических карт и возможность оценки влияния синоптических неоднородностей на структуру фазового фронта.

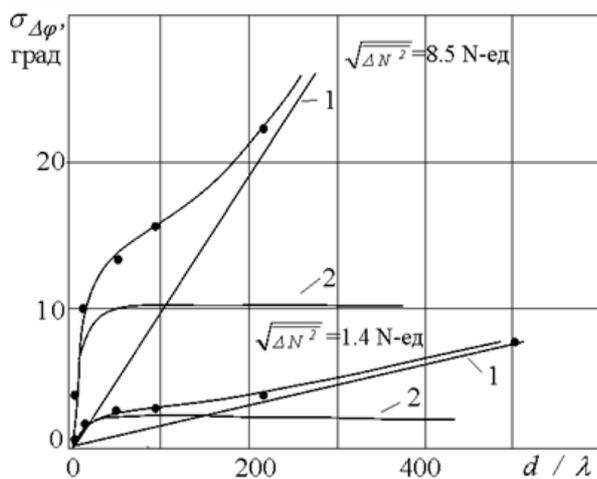


Рисунок 7 – Образцы структурных функций разности фаз

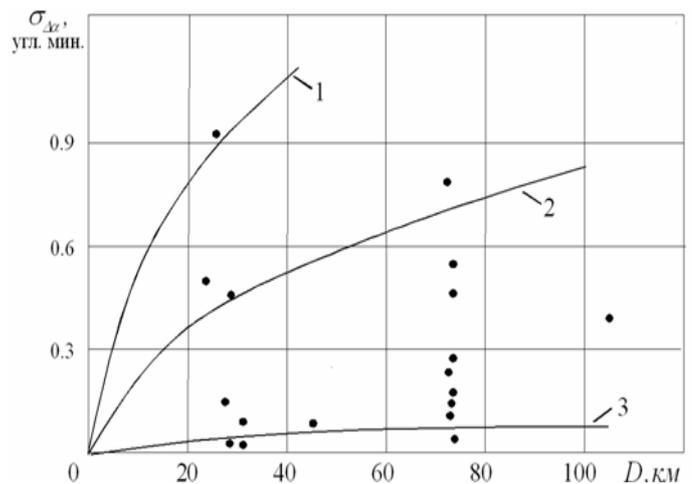


Рисунок 8 – Флуктуации угла прихода на трассах до 103 км

При анализе результатов работ, посвященных исследованию фазовой структуры поля за радиогоризонтом, зафиксировано значительное увеличение амплитуды медленных крупномасштабных флуктуаций угла прихода. На рисунке 9 представлены точками все результаты измерений СКО азимутального угла прихода в зоне тропосферного распространения, начиная с расстояния, соответствующего дальности дифракционного горизонта.

Подтверждена полученная теоретически линейная зависимость  $\sigma_{\Delta\alpha}$  от длины трассы, если объем рассеяния находится в толще пограничного слоя, где на формирование неоднородностей тропосферы влияет подстилающая поверхность. Показано, что дистанционная зависимость СКО медленных флуктуаций угла прихода соответствует известным зависимостям флуктуаций от расстояния как энергетических, так и неэнергетических параметров поля за радиогоризонтом.

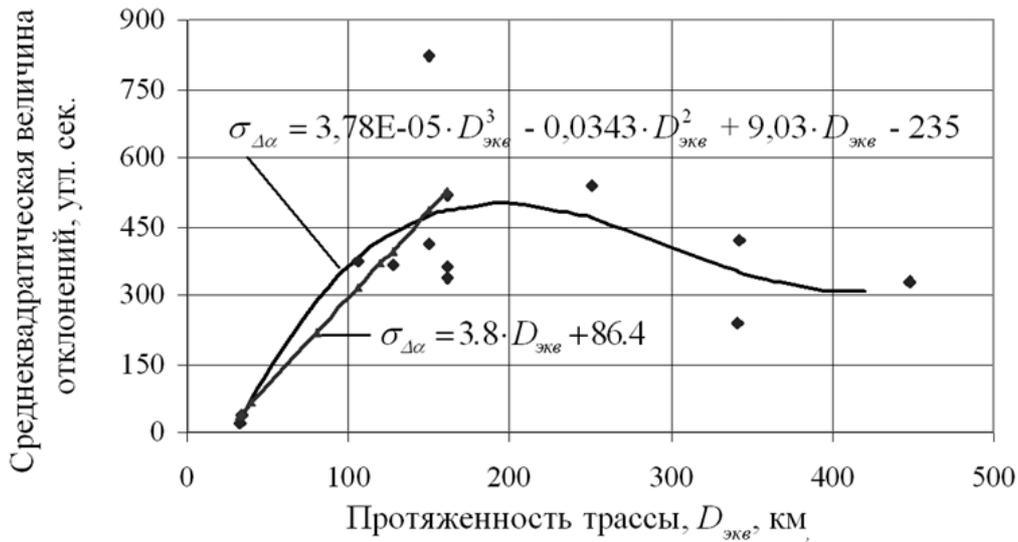


Рисунок 9 – СКО азимутального угла прихода в зоне ДТР

На основе гипотезы о наличии в тропосфере мезомасштабных слоев со случайным произвольно ориентированным наклоном и квазизеркальным отражением впервые получено объяснение зависимости дисперсии медленных флуктуаций угла прихода от направленности антенн; превышения ширины углового спектра сигнала по вертикали над шириной по горизонтали; немонотонная зависимость  $\sigma_{\alpha}$  от расстояния; наличия больших (до  $5^{\circ}$ ) и длительных отклонений азимутальных углов прихода; появление двойных диаграмм направленности. Гипотеза о наличии в тропосфере мезомасштабных случайно наклоненных слоев с произвольной ориентацией их наклона относительно ПБК не противоречит результатам модельных экспериментов, согласуется с данными натуральных радиофизических опытов, объясняет их, и, следовательно, подтверждается этими фактами.

В **главе шестой** изложены результаты исследований уровня сигнала на морских трассах тропосферного распространения, полученные в акватории Тихого океана (ТО). Работы выполнялись на трассах Охотского радиофизического полигона и во время рейсов специально оборудованных судов гидрометеослужбы и гидрографического управления ВМФ СССР. Автор диссертации принимал непосредственное участие в этих экспериментах, отвечая за разработку методов и алгоритмов расчета уровня сигнала на основе полученных опытных данных о радиометеорологических параметрах в различных районах океана. Эти исследования позволили создать региональную методику оценки значений множителя ослабления (МО), предназначенную для диагноза и прогноза уровня сигнала тропосферного радиоканала корабельных и береговых радиоэлектронных систем, а также для оперативного и перспективного планирования работы РЭС в заданном районе океана. Графические материалы методики расчета априорных среднемесячных величин множителя ослабления представлены на картах в «Радиоклиматическом тропосферном атласе Тихого океана».

Множитель ослабления, представленный в виде так называемых стандартных функций ослабления (СФО)  $V_0(D)$ , усредненных по всем сезонам года и по всей территории океана, задан зависимостями

$$\begin{aligned} \lambda = 10 \text{ см} \quad V_0(D) &= -(52,5 + 0,062 \cdot D), \text{ дБ}; \\ \lambda = 35 \text{ см} \quad V_0(D) &= -(45,6 + 0,062 \cdot D), \text{ дБ}; \\ \lambda = 180 \text{ см} \quad V_0(D) &= -(37,6 + 0,062 \cdot D), \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для учета влияния времени года и заданного района величина  $V_0(D)$  суммируется с районно-временной поправкой  $\Delta V$  – отклонением среднемесячных значений множителя ослабления от стандартной функции для заданных района и сезона. Величина этой поправки представлена на картах в виде изолиний по всей акватории Тихого океана.

При выполнении опытов большое внимание уделялось изучению мезомасштабных (медленных) флуктуаций с периодами несколько часов и больше. Анализ реализаций сигнала длительностью десятки и сотни часов позволил изучить структуру мезомасштабных флуктуаций уровня сигнала, выделить случайные и периодические (квазипериодические) их составляющие.

Установлено, что медленные изменения сигнала удастся выделить на фоне быстрых только при условии, что время наблюдения сигнала превышает 6 часов. Это видно на рисунке 10, где представлены две зависимости интенсивности флуктуаций от времени осреднения: полученные нами данные о множителе ослабления и известные литературные сведения об интенсивности флуктуаций скорости ветра. Основной причиной повышения уровня на тихоокеанских трассах ДТР является отражение радиоволн от слоистых неоднородностей, существующих в интервале высот от нескольких сотен метров до километров. Средняя их высота, указанная в атласе ТО для разных сезонов и регионов, имеет величину 0,6–1,8 км. На рисунке 11 представлен пример пространственно-временного изменения экспериментально измеренного множителя ослабления с превышением среднего уровня на 25 дБ и фонового значения – на 40 дБ.

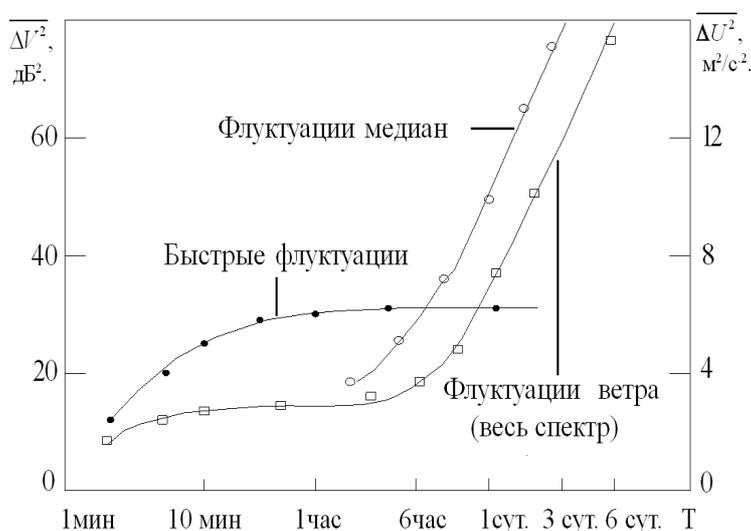


Рисунок 10 – Зависимость флуктуаций от времени осреднения

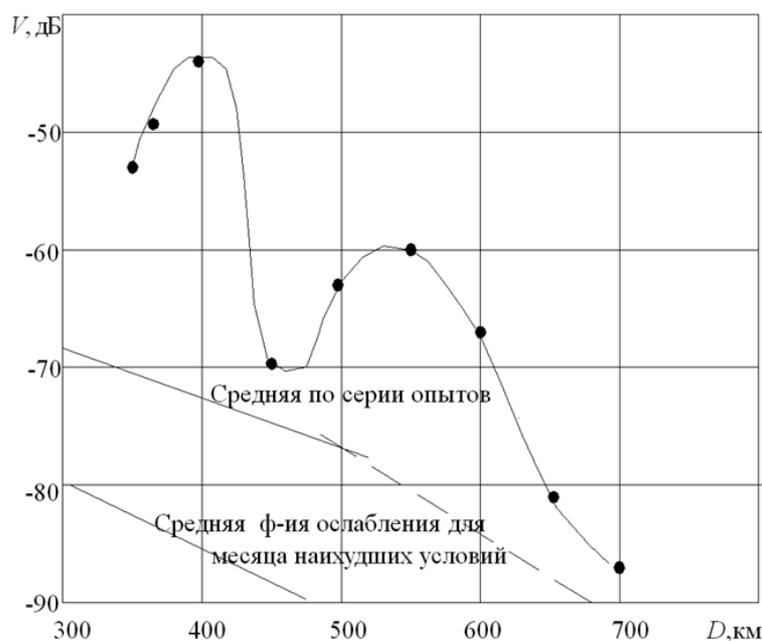


Рисунок 11 – Пример изменений множителя ослабления на трассе

Опытами, описанными в **седьмой главе**, установлено наличие статистической связи между значениями сигнала и параметрами ММН тропосферных неоднородностей при их измерении существующими метеорологическими и аэрологическими приборами. На этой основе для решения оперативных задач использования корабельных РЭС разработана методика оценки среднечасовых величин уровня сигнала. В методике был использован опыт учета влияния регулярных сезонных изменений, отработанный в метеорологии и экономике.

Изучаемые процессы представлены в виде  $y(t) = f(t) + \Delta f(t)$ , где  $f(t)$  – неслучайная функция, определяющая сезонные изменения величин сигнала и метеопараметров,  $\Delta f(t)$  – случайная функция с нулевой средней. Вычитая  $f(t)$  из исходных данных, получаем отклонения  $\Delta f(t)$ , процесс, близкий к нормальному с ослабленным влиянием циклических изменений.

Для учета влияния нескольких факторов формирования поля использован аппарат множественного регрессионного анализа. Для множителя ослабления  $V$  в момент времени  $t$  на трассе длиной  $D$  имеем

$$V(t, D) = V_0(t, D) + \sum_{l=1}^p k_l (M_l(t) - M_{lH}) + \xi(t), \quad (6)$$

где  $V_0(t, D)$  – неслучайная функция (норма), средняя для всей акватории ТО функция ослабления (ФО);  $M_l(t) - M_{lH}$  – отклонение  $l$ -го метеопараметра от регулярного сезонного хода (нормы  $M_{lH}$ );  $k_l$  – коэффициент регрессии каждого метеопараметра;  $\xi(t)$  – возмущение, характеризующее случайное отклонение от теоретической линии. Оценка величины МО  $\hat{V}(t, D)$  рассчитывается по известным априори нормам  $V_0(t, D)$ ,  $M_{lH}$ , известной величине  $k_l$  и измеренным в момент  $t$  значениям метеопараметров  $M_l$ .

Для предсказания уровня загоризонтного сигнала на основе зависимости (6) получены три регрессионных уравнения, где использовано 2, 4 и 9 метеопараметров: индекс преломления у земли; скорость ветра у земли; вертикальный градиент индекса преломления в интервале высот 0–1 км; скорость ветра в объеме рассеяния на высоте  $h$ ; интенсивность слоя (разность индекса преломления на границах слоя); толщина слоя (разность высот верхней и нижней границ); высота слоя над земной поверхностью; скачок величины вертикального градиента; высота скачка вертикального градиента. Достоверность и статистическая значимость прогностических уравнений подтверждена по критерию Колмогорова – Смирнова, проверкой по  $F$ -критерию для уровня 0,01, оценкой доверительных интервалов коэффициентов корреляции и объемом использованных данных.

На рисунке 12 представлены результаты измеренных и рассчитанных среднечасовых значений МО по независимым измерениям на маневренных трассах ТО при расхождении носителей передатчика и приемника на расстояния от 110 до 440 км.

На рисунке: кружки – результат расчета по двум измеренным на борту корабля метеопараметрам; точки – расчет по четырем параметрам, взятым с синоптических карт. Результаты всех испытаний методики оценки МО обобщены на рисунке 13, где представлены величины СКО разностей между измеренными и рассчитанными значениями множителя ослабления по всей совокупности опытов в зависимости от числа метеопараметров, использованных в уравнениях регрессии (0 – случай априорного прогноза).

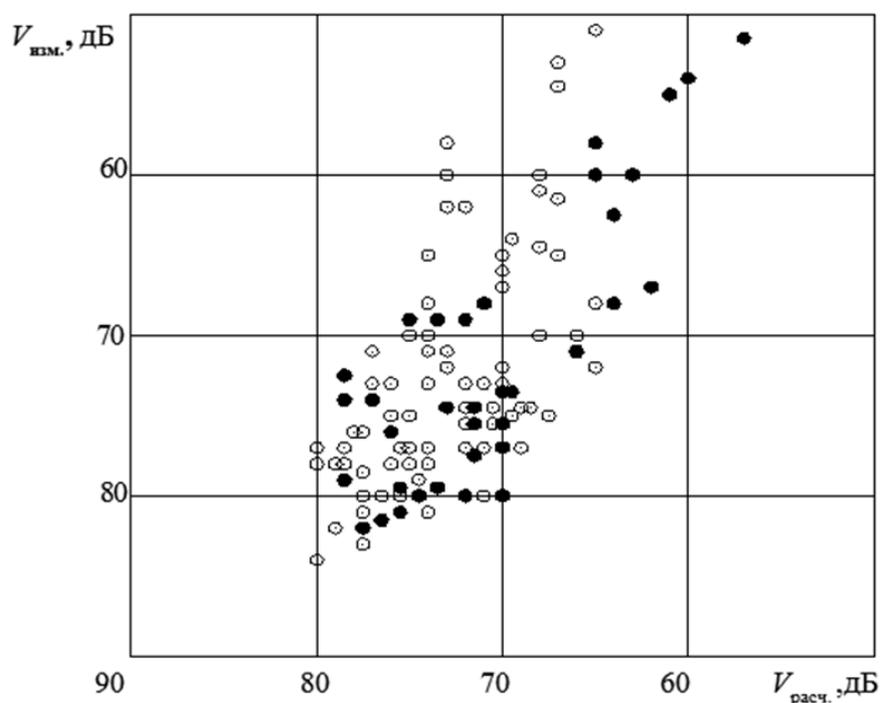


Рисунок 12 – Сравнение измерений и оценок МО

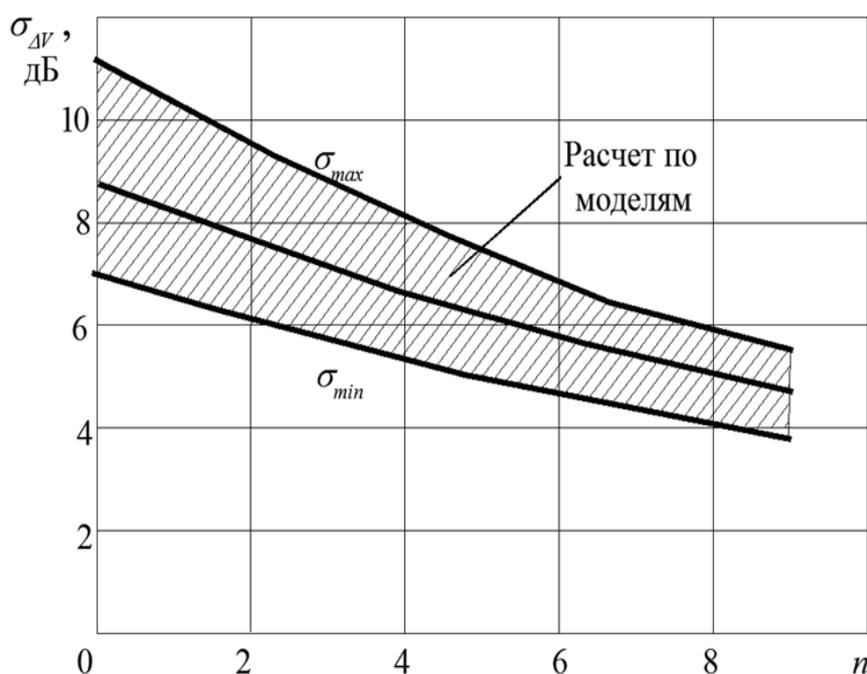


Рисунок 13 – Результаты испытаний методики оценки МО

Оперативные оценки среднечасовых значений МО, выполняемые на основе применения регрессионного уравнения в отклонениях от норм с использованием данных текущих метеоизмерений, позволяют уменьшить СКО ошибок ослабления для разных районов ТО в 2,5–3 раза по сравнению с оценкой без прогноза и в 1,5–2 раза по сравнению с априорной оценкой.

**Глава восьмая** посвящена практическому использованию результатов экспериментальных и теоретических исследований мезомасштабных флуктуационных явлений при распространении радиоволн 10 см в тропосфере. Показана зависимость СКО медленных флуктуаций углов прихода от дальности и вида трассы (суша, море); определено, что на дальностях от 100 до 300 км, при размерах апертуры антенн более 5 м мезомасштабная составляющая ошибки измерения азимутальных углов становится преобладающей (более 50% относительно полной ошибки). Для сухопутных трасс прямой видимости и дифракционного распространения разработана методика картографирования мезомасштабных ошибок измерения азимутальных углов ИРИ.

Пример карты представлен на рисунке 14, где нанесены значения коэффициента  $V$ , позволяющие рассчитывать величину  $\sigma_{\Delta\alpha}$  в зависимости от расстояния по формуле  $\sigma_{\Delta\alpha} = V \cdot D^{1/2}$ . Здесь  $V$  – функция физико-метеорологических параметров трассы.

Изолинии  $V$  рассчитаны для средней величины просвета трассы (50 м) и средних метеоусловий.

Картирование результатов изучения характеристик сигналов УКВ на морских загоризонтных трассах акватории ТО в виде радиоклиматического атласа позволило дать готовую для практического использования методику априорного прогноза ФО в зоне ДТР. На листах атласа представлены графики СФО, среднегодовой дистанционной зависимости, постоянной для всей

акватории ТО, и карты априорных поправок МО, величина которых меняется от времени года и района океана.

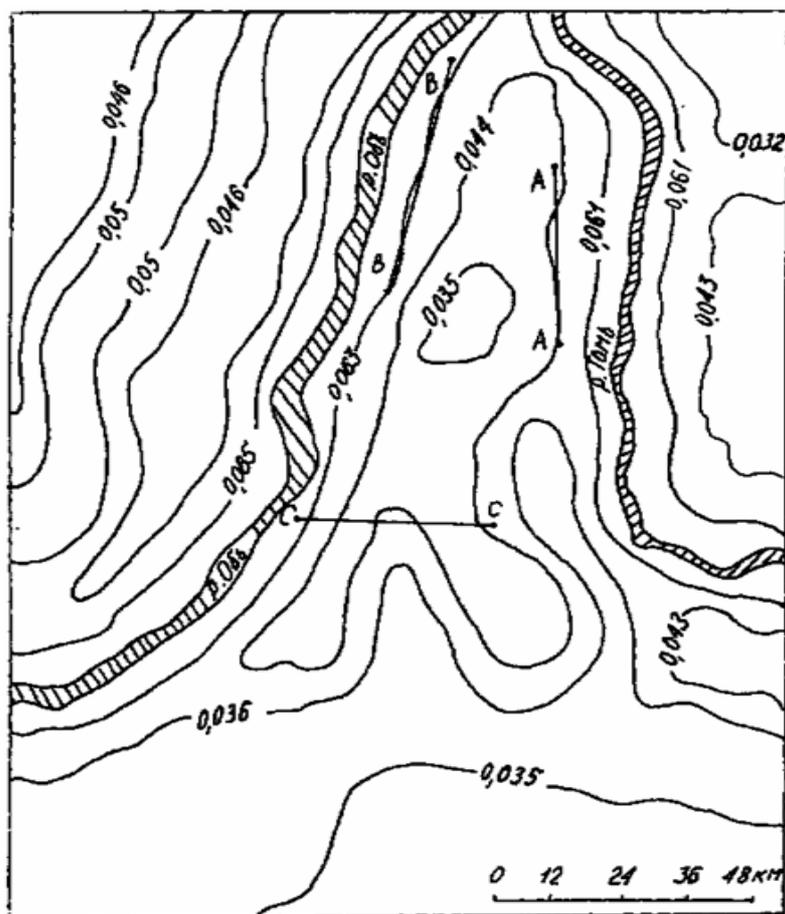


Рисунок 14 – Пример карты для оценки ошибок измерения азимутальных углов

На рисунке 15 представлен образец такой карты. Суммируя значение полученной по графикам СФО с величиной, считанной с карты априорной поправки МО, реализуем процедуру априорного прогноза среднемесячной ФО. При наличии измеренных во время выполнения прогноза радиометеорологических параметров, вводя их в эмпирические регрессионные уравнения (6), рассчитываем оперативную поправку, величина которой определяется текущей метеорологической обстановкой. Суммируя априорную оценку и оперативную поправку получаем прогнозируемую среднечасовую величину ФО на момент метеоизмерений. Используя разработанную методику расчета ФО в зоне дальнего тропосферного распространения и известные способы расчета ослабления в зонах интерференции и дифракции, создана модель системы оценки дальности до ИРИ с известными параметрами передающего устройства. Дальность определяется однопозиционным методом на основе рассчитанной дистанционной зависимости уровня принимаемого сигнала.

Расчет ФО, входящей в уравнение дальности, ведется отдельно для каждой из зон РРВ (прямая видимость, дифракция, ДТР) с учетом влияния

# К106. Множитель ослабления в зоне ДТР. Ноябрь

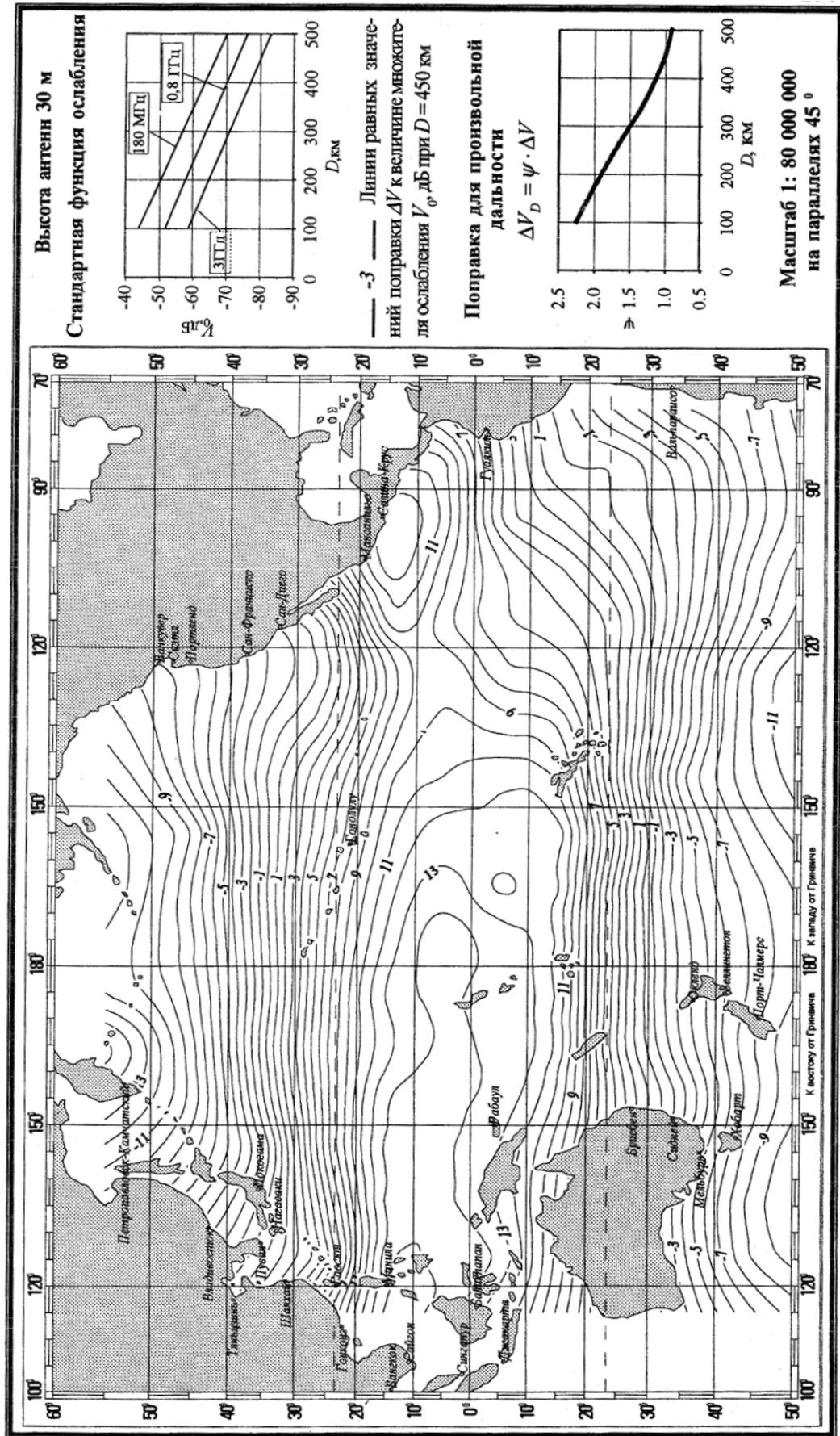


Рисунок 15 – Образец карты априорных поправок МО

волновода испарения, если он регистрируется по данным оперативных метеоизмерений или его наличие предполагается. Единая дистанционная зависимость МО для всех зон получена путем «сшивки» результатов отдельных участков. В пределах прямой видимости используются интерференционные формулы с учетом высоты волнения; в области дифракции – одночленная аппроксимация уравнений Фока; расчеты в этих зонах выполняются с учетом величины вертикального градиента коэффициента преломления и скорости ветра. Расчет дальности выполняет ПК, имеющий базу данных, предназначенную для работы в акватории ТО, и соответствующее программное обеспечение. Система позволяет решать три типа задач: определять дальность до работающего источника по принятому от него сигналу; определять дальнюю границу обнаружения ожидаемого источника радиоизлучения; определять максимальное расстояние, на котором активная РЛС может обнаружить носитель электронных средств РТР по отраженному от него радиосигналу.

Предусмотрены априорный или оперативный варианты расчета в соответствии с вариантами метеообеспечения. Для первого варианта используются сведения о средних на момент расчета метеорологических условиях, извлекаемых из банка данных. При оперативном расчете оператор вводит измеренные метеоданные, необходимые для расчета оперативной поправки МО статистической модели, с пульта в диалоговом режиме; поправка в программе суммируется с априорной величиной (нормой).

Результат прогнозирования представлен на экране монитора в виде графической зависимости ожидаемого уровня сигнала от дальности. Эту линию пересекает горизонталь, определяющая в соответствии с выбранной задачей или измеренную мощность принятого сигнала, или величину чувствительности приемного устройства радиосистемы РТР, или величину чувствительности приемного устройства активной РЛС. Работа системы заканчивается выводом на экран монитора числовых значений оценки расстояния до ИРИ, которое определяется координатой точки пересечения двух линий, отсчитываемых по оси дальности, и величины СКО оценки дальности.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Показано, что для дальнейшего решения фундаментальной проблемы уменьшения нежелательного влияния атмосферных возмущений на принимаемые сигналы, необходимо выявить и изучить ту часть погрешностей измерительных радиосистем, которая вносится неоднородностями с масштабами единицы-десятки километров, сведения о которых еще очень ограничены, вследствие чего их вклад «анализировать затруднительно» [1]. В настоящее время наши знания о мезомасштабных процессах и явлениях уже позволяют вести исследования их влияния на характеристики сигналов и искать методы уменьшения ошибок радиоизмерений.

2. Установлено экспериментально наличие мезомасштабных возмущений атмосферы на трассах распространения УКВ в тропосфере. В пограничном слое над сушей зарегистрированы неоднородности размером от единиц до 20 км с максимальным отклонением индекса преломления от средней по пространству

до 29 N-ед. и СКО между участками 5,2 N-ед. Над Тихим океаном мезомасштабные неоднородности имеют средний размер у поверхности 92 км при амплитуде 5,2 N ед., а на высоте 1 км 7,5 N-ед. при размерах 143 км. Аналогичные данные получены для Атлантического океана, где неоднородности имеют размеры 52–462 км и амплитуду 1,2–10,2 N-ед.

3. Проведены уникальные по продолжительности (1964–1994 гг.) и изученным регионам (юг Западной Сибири, Каспийское море, Тихий океан) исследования структуры электромагнитного поля на трассах протяженностью от 20 до 700 км. Результаты включают сведения о флуктуациях параметров сигналов в диапазоне волн от 3 см до 2 м и данные о многолетнем среднем уровне за радиогоризонтом. Впервые целенаправленно изучены характеристики мезомасштабных флуктуаций множителя ослабления и разности фаз за радиогоризонтом.

4. Зарегистрированы над сушей флуктуации фазового фронта с масштабами более 1 км с периодами до 4–6 часов. На трассах Тихого океана длиной до 620 км такие колебания имеют периоды более одного часа при средней величине поворота фронта  $0,31^\circ$ . Установлено наличие отдельных пространственных зон превышения множителя ослабления над средним значением до 30 дБ на участках трасс протяженностью 60–120 км, но более часты ситуации приема сигналов с медленными флуктуациями, когда их СКО равно 8–12 дБ внутри 6-и часового интервала, с увеличением до 10–17 дБ на интервале наблюдения 60 ч.

5. Впервые создана физико-статистическая модель мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления в приземном слое атмосферы, влияющих на распространение радиоволн; модель построена на основе описания известных физических закономерностей формирования вертикальных потоков воздуха над земной поверхностью с разными по температуре и увлажнению участками.

6. Разработано математическое описание крупномасштабной горизонтальной структуры фазового фронта над сушей, в котором учитываются как фазовые флуктуации, обусловленные переизлучением от земной поверхности, так и случайная рефракция на мезомасштабных неоднородностях, определяющая изменения угла прихода при разных метеоусловиях. Сравнение данных опытов на трассах и результатов расчета по мезомасштабной модели, параметры которой оценены по топографической карте, показало, что связь рассчитанных и измеренных углов прихода, согласно критериям Чеддока, высокая, позволяющая предложенную модель признать пригодной для практического использования.

7. Проверена гипотеза формирования электромагнитного поля в зоне ДТР за счет переизлучения радиоволн мезомасштабными неоднородностями с квазиплоскими границами, случайно наклоненными в пространстве. В компьютерных опытах смоделированы дистанционные зависимости СКО медленных флуктуаций углов прихода, изучено влияние параметров антенн и метеоусловий на их величину. Получено объяснение известным фактам отклонений этих углов в горизонтальной плоскости до 1-3 и даже  $5^\circ$ , и ряду

других, зарегистрированных в опытах явлений, не имеющих интерпретации с позиций теорий турбулентного рассеяния и отражения от протяженных горизонтальных слоев. Гипотеза подтверждается данными натуральных экспериментов, объясняет их, и может быть принята для последующей проверки в качестве существенного механизма ДТР.

8. Разработана модернизированная регрессионная модель прогноза и диагноза множителя ослабления на трассах ДТР, основанная на взаимосвязи отклонений радио- и метеовеличин от климатических норм этих параметров, позволяющая исключить погрешности расчетов из-за наличия циклических составляющих в изучаемых переменных, в отличие от используемых ранее методик регрессионного анализа по абсолютным значениям, имеющим эту погрешность.

9. Разработан картографический метод оценки мезомасштабных флуктуационных ошибок измерения азимутальных углов, возникающих из-за наличия локальных возмущений коэффициента преломления в приземном слое атмосферы. На карте нанесены изолинии, позволяющие рассчитывать величину ошибки в зависимости от расстояния и данных о метеоусловиях. Сформулированы методические рекомендации по практическому использованию таких карт.

10. Разработаны методики практического применения данных измерений уровней сигналов в акватории Тихого океана, представленных на картах радиоклиматического атласа. Карты являются основой априорного прогноза функции ослабления в зоне ДТР: среднегодовой дистанционной зависимости, постоянной для всей акватории ТО; среднемесячных значений, рассчитываемых с учетом вклада априорных поправок, величина которых меняется в зависимости от времени года и района океана. В методике оценки среднечасовых значений множителя ослабления, созданной на основе атласа, используется многофакторное регрессионное уравнение в отклонениях от норм, дающее дистанционную зависимость текущего значения множителя от набора получаемых на корабле метеопараметров, что позволило создать макет однопозиционной системы оценки дальности до источников радиоизлучения с известными параметрами передающего устройства.

Таким образом, в выполненной диссертационной работе, на основе изучения мезомасштабных неоднородностей, определяющих наличие пространственно-временных низкочастотных искажений принимаемых сигналов УКВ при распространении в атмосфере, и многолетних опытов по изучению этих искажений на тропосферных трассах, разработаны и экспериментально проверены физико-статистические модели неоднородностей с размерами единицы-десятки километров и периодами изменений от минут до часов. На основании этих моделей разработаны методы оценки погрешностей измерений углов с уменьшенными ошибками за счет учета конкретных метеоусловий в период радиоизмерений. Разработаны методики прогноза функций ослабления сигналов УКВ за радиогоризонтом, которые могут быть использованы для оценки дальности до источника излучения на основе рассчитанной дистанционной зависимости уровня принимаемого сигнала, а

также для определения дальней границы обнаружения источника или максимальной дальности обнаружения цели с известной ЭПР активным радиолокатором. Полученные результаты являются вкладом в решение фундаментальной проблемы улучшения точностных характеристик измерительных радиосистем; эти методы также полезны при решении других радиофизических и прикладных научно-технических задач народного хозяйства.

### Список цитируемой литературы

1. Яковлев О.И. Распространение радиоволн : учеб. пособие / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев; под. ред. О.И. Яковлева. – М. : ЛЕНАНД, 2016. – 496 с.
2. Крейн Р.К. Фундаментальные ограничения, связанные с процессами распространения радиоволн / Р.К. Крейн // Тр. ТИИЭР. – 1981. – Т. 69, № 2. – С. 64–80.
3. Экспериментальные исследования влияния атмосферы на пространственные измерения в близгоризонтной зоне / Ф.Д. Заблоцкий, Н.И. Кравцов, А.Л. Островский [и др.] // XV Всесоюзная конф. по распространению радиоволн. – Алма-Ата, М. : Наука, 1987. – С. 287–288.
4. Куштин В.И. Разработка и исследование методов учета влияния атмосферы на результаты измерений радиоэлектронными системами: дис. ... д-ра техн. наук по спец. 25.00.32 / В. И. Куштин. – М. : МИИГАиК, 2003. – 209 с.
5. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование / Н.Ф. Вельтищев. – ВМО-N701, 1988. – 137 с.
6. Вшивкова О.В. Учет изменения характера подстилающей поверхности вдоль измеряемой дистанции для целей повышения точности измерения расстояний электронным тахеометром / О.В. Вшивкова, С.Н. Круглов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2007. – № 5, – С. 3-9.

### ОСНОВНЫЕ НИОКР И ПРОЕКТЫ, ГДЕ БЫЛИ ИСПОЛЬЗОВАНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- НТО по НИР «Гребень», маш. ТИРЭТ, Томск, 1965.
- НТО по НИР «Структура», маш. ТИРЭТ, Томск, 1966.
- НТО по НИР «Чайка», маш. ТИРЭТ, Томск, 1968.
- НТО по НИР «Пунктир», маш. ТИАСУР, Томск, 1974.
- НТО по НИР «Лимб», маш. ТИАСУР, Томск, 1974.
- НТО по НИР «Тирада-МВО», маш. ТИАСУР, Томск, 1979.
- НТО по НИР «Томагавк-РВО», маш. ТИАСУР, Томск, 1981.
- НТО по НИР «Торм-РВО», маш. ТИАСУР, Томск, 1985.
- ИНСТРУКЦИЯ по оценке радионаблюдаемости в диапазоне УКВ над поверхностью Тихого океана, маш. ТИАСУР, Томск, 1986.
- НТО по НИР «Тевли-РВО», маш. ТИАСУР, Томск, 1989.
- НТО по НИР «Трактат», маш. ТИАСУР, Томск, 1990.

Тема 23/92. Исследование сверхдальнего распространения УКВ в тропосферных каналах с целью увеличения дальности и пропускной способности адаптивных систем связи и управления, маш. ТИАСУР, Томск, 1992.

НТО по НИР «Фаза-НИТИ», маш. ТУСУР, Томск, 1997–2001.

НТО по НИР «Моракор-РВО», маш. ТУСУР, Томск, 1992–2006.

НТО о составной части ОКР «Звезда – ТУСУР», маш. ТУСУР, Томск, 2005–2011.

НТО по НИР «Вектор». «Экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик сигналов сантиметрового диапазона на наземных трассах». Исходные данные для проектирования пеленгаторов, маш. ТУСУР, Томск, 2010.

Отчет о составной части по НИР «Экспериментальные исследования приземного и пограничного слоев атмосферы на радиофизическом полигоне». «Цимус-Ф-ТУСУР», маш. ТУСУР, Томск, инв. № 05.04/01, 2011.

Проект 16 АВЦП «Пространственно-временные модели УКВ сигналов, распространяющихся вдоль неровной земной поверхности», маш. ТУСУР, Томск, 2008.

Проект-053-017. «Анализ и прогнозирование искажений СВЧ радиоволн и звуковых волн при их распространении в неоднородной тропосфере над неоднородной и неровной земной поверхностью», маш. ТУСУР, Томск, 2009.

Проект-043-017. «Исследования по созданию перспективных пассивных космических систем мониторинга наземных источников радиоизлучения», маш. ТУСУР, Томск, 2009, 2011.

Проект № 7 2336. «Концептуальные основы и научно-методическое обоснование экспериментальных исследований структуры электромагнитных сигналов на наземных и космических трассах с использованием уникального РФП ТУСУР в интересах развития систем радиолокации, навигации и связи», маш. ТУСУР, Томск, 2012.

**РАБОТА АВТОРА В РАМКАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ПРОГРАММ:**

– аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008) годы», проект РНП.2.1.2.4289;

– федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», государственный контракт № 02.740.11.0232.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации по теме диссертации в российских научных журналах и журналах, входящих в международные базы данных, рекомендованные ВАК**

1. Шарыгин Г.С. Экспериментальные исследования стабильных вариаций фазового фронта сантиметровых радиоволн на приземных трассах / Г.С. Шарыгин, Ю.М. Полищук, О.Н. Киселев, Н.М. Лесков // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. – 1968. – Т. 11, № 5. – С. 768–769.

2. Киселев О.Н. Экспериментальные исследования медленных вариаций амплитуды и фазы 10-сантиметровых радиоволн на приземных трассах / О.Н. Киселев, В.М. Короткова, Н.М. Лесков, Ю.М. Полищук, Г.С. Шарыгин // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. – 1969. – Т. 12, № 1. – С. 9–14.

3. Киселев О.Н. Повышение точности расчета уровней сигнала на тропосферных радиоперелиниях / О.Н. Киселев // Электросвязь. – 1982. – № 8. – С. 54–55.

4. Киселев О.Н. Крупномасштабная структура полей радиометеорологических параметров над океаном / О.Н. Киселев, М.И. Родионов // Изв. РАН. Сер. Физ. атмосферы и океана. – 1992. – Т. 28, № 12. – С. 1213–1215.

5. Киселев О.Н. Оценка среднечасовых величин множителя ослабления сигнала в зоне дальнего тропосферного распространения / О.Н. Киселев, В.Н. Ковалев // Радиотехника. – 1993. – № 2. – С. 73–77.

6. Госенченко С.Г., Киселев О.Н., Мещеряков А.А. Исследование длиннопериодных изменений уровня сигнала на морской загоризонтной трассе / С.Г. Госенченко, О.Н. Киселев, А.А. Мещеряков // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40, № 5. – С. 762–765.

7. Киселев О.Н. Мезомасштабные неоднородности коэффициента преломления приземного слоя атмосферы / О.Н. Киселев // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 6. – С. 47–51.

8. Киселев О.Н. Связь угла прихода УКВ радиоволн с мезомасштабными флуктуациями метеорологических величин при распространении над пересеченной местностью / О.Н. Киселев // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 6. – С. 52–56.

9. Киселев О.Н. Исследование закономерностей флуктуаций угла прихода УКВ за радиогоризонтом на основе численного имитационного эксперимента / О.Н. Киселев // Доклады ТУСУР. – 2008. – Т. 2(18), Ч. 2. – С. 10–13.

10. Киселев О.Н. Мезомасштабные пространственно-временные флуктуации текущих значений индекса преломления вблизи земной поверхности // Доклады ТУСУР. – 2010. – Т. 1(21), Ч. 2. – С. 17–22.

11. Киселев О.Н. Пространственные мезомасштабные вариации индекса преломления над неоднородной земной поверхностью / О.Н. Киселев // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, № 6. – С. 573–577.

12. Kiselev O.N. Mesoscale Spatial Variations of the Refraction Index over Nonuniform Earth Surface / O.N. Kiselev // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2013. – Vol. 58, No 6. – P. 517–520.

13. Киселев О.Н. Исследование распространения радиоволн на наземных трассах при наличии мезомасштабных квазикогерентных ячеек / О.Н. Киселев // Изв. вузов. Сер. Физика. – 2016. – Т. 59, № 12/3. – С. 84–87.

14. Киселев О.Н. Радиометеорологический атлас Мирового океана – основа для создания методики прогноза характеристик сигналов УКВ за радиогоризонтом / О.Н. Киселев, Г.С. Шарыгин, М.В. Крутиков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 68–73.

**Депонированные рукописи работ, аннотированные в научных журналах**

15. Киселев О.Н. Рефракция в приземном слое атмосферы / О.Н. Киселев // Сб. «Реф. инф. по радиоэлектронике». – 1968. – № 11, реф. 10212. – 3 с.

**Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ**

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611966. Программа загрузки ежегодных отчетов по измерению метеоданных в различных регионах мира / Захаров Ф.Н. (RU), Карнышев В.И. (RU), Киселев О.Н. (RU). Дата регистрации в реестре программ 15.02.2016.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663510. Программа имитационного моделирования мезомасштабных флуктуаций неэнергетических характеристик радиолокационных сигналов за радиогоризонтом / Киселев О.Н. (RU), Николаенко В.В. (RU). Дата регистрации в реестре программ 06.12.2017.

**Публикации в рецензируемом журнале\***

18. Крутиков М.В. Ограничения разрешения системами РСА за счет случайной природы поля вблизи радиогоризонта / М.В. Крутиков, Г.С. Шарыгин, О.Н. Киселев // Доклады ТУСУР. – Томск, 2000. – Т. 4. – С. 97–101.

19. Киселев О.Н. Исследование статистических связей мезомасштабных флуктуаций угла прихода сигналов УКВ с радиометеорологическими параметрами на трассах протяженностью до 200 км / О.Н. Киселев, А.А. Мещеряков // Доклады ТУСУР. – Томск, 2000. – Т. 4. – С. 118–122.

20. Ровкин М.Е. Модель дистанционной зависимости величины множителя ослабления для загоризонтной морской трассы распространения УКВ / М.Е. Ровкин, Г.С. Шарыгин, О.Н. Киселев // Доклады ТУСУР. – Томск, 2000. – Т. 4. – С. 183–186.

21. Госенченко С.Г. Система оперативного прогноза дальности действия и зон видимости радиотехнических систем различного назначения / С.Г. Госенченко, Б.П. Дудко, О.Н. Киселев, В.Н. Ковалев // Доклады ТУСУР. – Томск, 2000. – Т. 4. – С. 74–78.

22. Киселев О.Н. Пространственные характеристики мезонеоднородностей тропосферных радиометеорологических полей над океаном / О.Н. Киселев, С.Г. Госенченко, Л.И. Кижнер, В.И. Слуцкий // Доклады ТУСУР. – Томск, 2000. – Т. 4. – С. 112–117.

23. Киселев О.Н. Экспериментальное изучение мезомасштабных флуктуаций индекса преломления в приземном слое атмосферы / О.Н. Киселев, Л.И. Кижнер, М.В. Крутиков // Доклады ТУСУР. – 2006. – Т. 6(14). – С. 47–51.

---

\* С 2007 г. журнал включен в списки ВАК.

### Атлас и монографии

24. Радиоклиматический тропосферный атлас Тихого океана / под ред. Г.С. Шарыгина. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2000. – 171 с.

25. Киселев О.Н. Мезомасштабные неоднородности коэффициента преломления в тропосфере и их влияние на распространение радиоволн УКВ-диапазона: моногр. / О.Н. Киселев. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 199 с.

26. Акулиничев Ю.П. Характеристики СВЧ-радиосигналов в системах радиолокации, навигации и связи: моногр. / Ю.П. Акулиничев, А.С. Аникин, С.Г. Госенченко [и др.]; под общ. ред. проф., д-ра техн. наук Г.С. Шарыгина. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 114 с.

### Публикации в трудах Всесоюзных, Всероссийских и Международных конференций

1. Киселев О.Н. Статистика неоднородностей коэффициента преломления в приземном слое атмосферы / О.Н. Киселев // 9 Всесоюзная конф. по распространению радиоволн, 23-28 июня 1969 г. Авторефераты докладов. – Харьков, 1969. – Ч. 1. – С. 2.

2. Киселев О.Н. Зависимость статистических характеристик сигналов сантиметрового диапазона на приземных трассах от времени суток и метеорологических условий / О.Н. Киселев, Г.Д. Носкова, Н.М. Лесков, Ю.М. Полищук, Г.С. Шарыгин // Тр. 8 Всесоюзной конф. по распространению радиоволн. Ашхабад, 1967. – М. : Науч. совет АН СССР по компл. проблеме «Распространение радиоволн», 1972. – С. 7.

3. Лесков Н.М. Корреляционные свойства поля сантиметровых радиоволн при распространении на приземных трассах / Н.М. Лесков, Ю.М. Полищук, О.Н. Киселев, Б.С. Рыбаков, А.В. Ерохин, Г.С. Шарыгин // Тр. 8 Всесоюзной конф. по распространению радиоволн. Ашхабад, 1967. – М. : Науч. совет АН СССР по компл. проблеме «Распространение радиоволн», 1972. – С. 8.

4. Лесков Н.М. Зависимость от дальности статистических характеристик сигналов сантиметрового диапазона / Н.М. Лесков, Ю.М. Полищук, О.Н. Киселев, Г.С. Шарыгин // Тр. 8 Всесоюзной конф. по распространению радиоволн. Ашхабад, 1967. – М. : Науч. совет АН СССР по компл. проблеме «Распространение радиоволн», 1972. – С. 7.

5. Киселев О.Н. Потенциальные возможности линейной радиометеорологической модели прогноза / О.Н. Киселев // Измерительные комплексы и системы : тез. докл. Всесоюзной конф. «Исследование и разработка прецизионных измерительных комплексов и систем с использованием радиоволновых и оптических каналов связи». – Томск, 1981. – Ч. 1. – С. 42-44.

6. Киселев О.Н. Пространственные корреляционные свойства метеорологических элементов в тропосфере над поверхностью океана и разрешающая способность радиоклиматологических карт / О.Н. Киселев, Б.П. Дудко, И.Л. Корнеев // Тез. докл. 7 Всесоюзного совещания по

радиометеорологии. Суздаль, 1986. – М. : Инф. центр ВНИИГМИ-МЦД, 1986. – С. 1.

7. Дудко Б.П. Методика по оценке радионаблюдаемости в диапазоне УКВ над поверхностью Тихого океана / Б.П. Дудко, О.Н. Киселев, В.Н. Ковалев, Л.В. Кучеров, Г.С. Шарыгин, В.И. Фомичев // Тез. докл. 15 Всесоюзной конф. по распространению радиоволн. Алма-Ата, 21-24 октября 1987 г. – М. : Наука, 1987. – С. 92-93.

8. Киселев О.Н. Многофакторная статистическая модель для оценки множителя ослабления сигнала на загоризонтных трассах / О.Н. Киселев, Б.П. Дудко, В.Н. Ковалев // Тез. докл. 15 Всесоюзной конф. по распространению радиоволн. Алма-Ата, 21-24 октября 1987 г. – М. : Наука, 1987. – С. 1.

9. Киселев О.Н. Об экспериментальной оценке аномального состояния радиоканала / О.Н. Киселев, С.Г. Госенченко // Тез. докл. Всесоюзного совещания по приземному распространению радиоволн и электромагнитная совместимость. – Улан-Удэ, 1990. – С. 27-28.

10. Киселев О.Н. Учет автокорреляции процессов при построении радиометеорологических моделей прогнозов / О.Н. Киселев, В.Н. Ковалев // Тез. докл. Всесоюзного совещания по приземному распространению радиоволн и электромагнитная совместимость. – Улан-Удэ, 1990. – С. 2.

11. Госенченко С.Г. Структурный анализ флуктуаций уровня загоризонтного сигнала / С.Г. Госенченко, О.Н. Киселев, А.А. Мещеряков // Сб. тр. 3 Международной науч.-техн. конф. «Методы представления и обработки случайных сигналов и полей». – Харьков, 1993. – С. 45-46.

12. Дудко Б.П. Проверка многофакторной модели множителя ослабления для загоризонтных морских трасс / Б.П. Дудко, О.Н. Киселев, В.Н. Ковалев, Г.С. Шарыгин // Тез. докл. 17 конф. по распространению радиоволн. Ульяновск, 21-24 сентября 1993 г. – Ульяновск: УлПИ, 1993. – С. 76.

13. Киселев О.Н. Исследование характеристик часовых медиан радиосигналов на морских тропосферных трассах / О.Н. Киселев, С.Г. Госенченко, А.А. Мещеряков // Тез. докл. 17 конф. по распространению радиоволн. Ульяновск, 21-24 сентября 1993 г. – Ульяновск : Ул.ПИ, 1993. – С. 77.

14. Kiselev O.N. Prediction of attenuation factor hour median for UHF wave tropospheric over sea propagation using meteorological parameters / O.N. Kiselev, B.P. Dudko, V.N. Kovalev, G.S. Sharygin // Open Symposium «Climatic Parameters in Radiowave Propagation Prediction CLIMPARA'94». Pre-prints of papers. – Moscow, 31 May-3 June 1994. – P. 9.5.1-9.5.3.

15. Kiselev O.N. Mesoscale modelling of tropospheric path-loss variations / O.N. Kiselev, S.G. Gosenchenko, A.A. Mescheryakov // Open Symposium «Climatic Parameters in Radiowave Propagation Prediction CLIMPARA'94». Pre-prints of papers. – Moscow, 31 May-3 June 1994. – P. 11.4.1-11.4.3.

16. Sharygin G.S. Radioclimatic maps of UHF radiowave over-sea propagation parameters for the Pacific Ocean / G.S. Sharygin, V.I. Slutski, B.P. Dudko, O.N. Kiselev, I.L. Korneev, M.V. Krutikov // Open Symposium «Climatic Parameters

in Radiowave Propagation Prediction CLIMPARA''94». Pre-prints of papers. – Moscow, 31 May-3 June 1994. – P. 12.3.1-12.3.8.

17. Kiselev O.N. Horizontal Radiowave Refraction over Terrestrial Paths / O.N. Kiselev // Pros. PIERS-95. – Seattle, WA, USA. 1995. – P. 1061.

18. Sharygin G.S. Prediction system of passive radar range beyond-the-horizon over the sea (PSPRR-TACSR) / G.S. Sharygin, S.G. Gosenchenko, B.P. Dudko, O.N. Kiselev, D.V. Glushich // PIERS. Progress in Electromagnetics Research Symposium. Proceedings. 24-28 July, 1995. – Seattle, Washington, USA: The University of Washington, 1995. – P. 1060. 2 с.

19. Киселев О.Н. Мезомасштабные возмущения среды распространения и тропосферных сигналов УКВ / О.Н. Киселев // Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации» : тез. докл. – Туапсе, 1995. – С. 40.

20. Garin S.A. Some application of climatic parameters in beyond-the-horizon radiowave propagation / S.A. Garin, O.N. Kiselev // Proc. 7th URSI Open Sympos. печ. – Ahmedabad, 1995. – P. 2.

21. Глушич Д.В. Система диагностики уровня электромагнитного поля над океаном / Д.В. Глушич, С.Г. Госенченко, Б.П. Дудко, О.Н. Киселев, Г.С. Шарыгин // СИБКОНВЕРС''95. Международная конф. по использованию результатов конверсии науки в вузах Сибири для международного сотрудничества. Томск, 2-4 октября 1995 г. : тр. конф. – Томск : Том. гос. акад. систем упр. и радиоэлектроники, 1996. – С. 11-12.

22. Киселев О.Н. Радиометеорологическая модель мезомасштабных структур тропосферы / О.Н. Киселев // СИБКОНВЕРС''95. Международная конф. по использованию результатов конверсии науки в вузах Сибири для международного сотрудничества. Томск, 2-4 октября 1995 г. : тр. конф. – Томск : Том. гос. акад. систем упр. и радиоэлектроники. – 1996. – С. 112-114.

23. Киселев О.Н. Мезомасштабные тропосферные неоднородности индекса преломления и их влияние на распространение УКВ / О.Н. Киселев // Российская науч.-техн. конф. по дифракции и распространению радиоволн : сб. докл. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1996. – С. 129-132.

24. Киселев О.Н. Модели мезомасштабных возмущений поля индекса преломления в тропосфере / О.Н. Киселев // 18 Всероссийская конф. по распространению радиоволн. Санкт-Петербург, 17-19 сентября 1996 г. – М., 1996. – С. 461-462.

25. Krutikov M.V. Resolution Limitations on the SAR Systems Determinable on Random Nature of the Field Near Radio Horizon / M.V. Krutikov, G.S. Sharygin, O.N. Kiselev // Proceedings of the International Conference RADAR''97. Edinburg, UK, October 14-16, 1997. – Institute of Electrical Engineering, 1997.

26. Киселев О.Н. Мезомасштабные составляющие угловых ошибок местоопределения наземных источников излучения при пеленговании с борта ЛА / О.Н. Киселев // Тр. 2-й Всероссийской науч.-техн. конф. по проблемам создания перспективной авионики. Томск, 15-17 апреля 2003 г. – Томск, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2003. – С. 202-206.

27. Киселев О.Н. Модель медленных флуктуаций угла прихода УКВ за радиогоризонтом / О.Н. Киселев // 22 Всероссийская науч. конф. «Распространение радиоволн» РРВ-22 г. Ростов-на-Дону – п. Лоо, 22-26 сентября 2008 г. : тр. конф. Т. 1. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008. – С. 246-249.

28. Мещеряков А.А. Применение численных моделей атмосферы для мониторинга условий распространения УКВ на приземных трассах / А.А. Мещеряков, Л.И. Кижнер, О.Н. Киселев // XV Международная науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» : сб. докл. конф. «RLNC 2009». Т. 1. – Воронеж : Изд. НФП «САКВОЕЕ», 2009. – С. 557-561.

29. Киселев О.Н. Характеристики УКВ сигналов за радиогоризонтом при отражении от произвольно наклоненных мезомасштабных слоев (компьютерный эксперимент) / О.Н. Киселев // 23 Всероссийская науч. конф. РРВ, 23-26 мая 2011 г. – Йошкар-Ола, 2011. – С. 38-41.

30. Киселев О.Н. Отражение от произвольно наклоненных мезомасштабных слоев объясняет закономерности и редкие явления дальнего тропосферного распространения: результаты проверки гипотезы на основе натуральных и модельных опытов / О.Н. Киселев // II Всероссийской науч.-техн. конф. «Системы связи и радионавигации» : сб. тез. – Красноярск : АО «НПП «Радиосвязь», 2015. – С. 22-25.

31. Киселев О.Н. Изучение мезомасштабных явлений и процессов при распространении ультракоротких радиоволн в тропосфере / О.Н. Киселев // XXV Всероссийская открытая науч. конф. «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. Томск, 4–9 июля 2016 г. : тр. конф. Т. 3. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – С. 56-59.

32. Киселев О.Н. Проверка возможности создания радиометеорологической методики прогноза характеристик сигналов УКВ за радиогоризонтом / О.Н. Киселев, Г.С. Шарыгин, М.В. Крутиков // III Всероссийская науч.-техн. конф. «Системы связи и радионавигации». 22-23 сент. 2016 : сб. тез. – Красноярск, 2016. – С. 40-43.

33. Захаров Ф.Н. Опыт ТУСУРа в измерении параметров тропосферы над морем для определения дальности действия морских РЭС / Ф.Н. Захаров, О.Н. Киселев, Г.С. Шарыгин // Международный науч.-техн. форум «Армия – 2017». – М., 23 августа 2017 г.

Заказ 285. Тираж 100 экз.

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел: (3822) 533018.