

Министерство образования и науки Российской Федерации
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Хуторов Владислав Евгеньевич

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТРОПОСФЕРЫ ПО РАДИОИЗМЕРЕНИЯМ СЕТИ
ПРИЕМНИКОВ GPS-ГЛОНАСС

специальность 01.04.03 - радиопизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Непогодин И.А.

Казань – 2014

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Тропосферные неоднородности и методы их исследования.....	14
1.1 Классификация тропосферных неоднородностей по масштабам	14
1.2 Макромасштабные неоднородности.....	16
1.3 Микромасштабные неоднородности	19
1.4 Мезомасштабные неоднородности.....	22
1.5 Мониторинг атмосферных параметров, в том числе радиометодами	25
1.6 Выводы	29
Глава 2 Методика дистанционного радиозондирования тропосферы сетью наземных приемников ГНСС.....	30
2.1 Эксперимент на сети приемников ГНСС.....	30
2.2 Исключение ошибок измерений и оценка точности фазовых измерений в эксперименте...	36
2.3 Тропосферная задержка радиосигналов спутниковых навигационных систем и ее вариации	46
2.4 Сравнение экспериментальных результатов с численным моделированием тропосферной задержки радиоволн	53
2.5 Выводы	55
Глава 3 Структурная функция атмосферной задержки радиосигналов СНС как количественная характеристика атмосферных неоднородностей	57
3.1 Математический аппарат структурных функций как метод исследования атмосферных флуктуаций	57
3.2 Методика исследования горизонтальных структурных функций атмосферной задержки радиосигналов ГНСС	62
3.3 Структурная функция ионосферной задержки дециметровых радиоволн.....	64
3.4 Структурные функции тропосферной задержки дециметровых радиоволн	66

3.5 Выводы	70
Глава 4 Проявление атмосферной динамики в структурных функциях тропосферных задержек радиосигналов ГНСС	72
4.1 Суточная динамика горизонтальных структурных функций тропосферной задержки радиоволн	72
4.2 Сезонная динамика временных структурных функций тропосферной задержки радиоволн	77
4.3 Мезомасштабная горизонтальная структура атмосферы, восстановленная по измерениям сигналов ГНСС.....	80
4.4 Вертикальная динамика горизонтальной структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн	85
4.5 Выводы	92
Заключение	94
Список обозначений и сокращений	96
Словарь терминов	97
Список иллюстративного материала	98
Литература	100
Приложения	114

Введение

Объект исследования, разработанности актуальность задачи

Изучение вопросов влияния неоднородностей на распространение радиоволн, а также генерации неоднородностей, трансформации и их взаимодействия является важной и актуальной проблемой, имеющей научное и практическое значение в области радиофизики и физики атмосферы. В связи с этим несомненный интерес представляет мониторинг мезомасштабной структуры атмосферы. Мониторинг состояния нижней атмосферы в современных условиях необходим в задачах оперативного прогноза метеосостояния [8], повышение точности радиотехнических измерений [52], опасных метеоявлений [35,40]. Известно, что учет мезомасштабной структуры атмосферы повышает точность решения указанных задач [52].

На сегодняшний день атмосферные исследования проводятся в основном в глобальном масштабе, но для полного представления о динамике и энергетике атмосферы интерес представляют также мало исследованные масштабы неоднородностей в несколько километров (мезомасштабные) [83].

Однако, сейчас недостаточно экспериментальных исследований локальной и мезомасштабной изменчивости атмосферы. Зондирование приземного слоя с космических аппаратов и аэрологические данные не позволяют с высоким временным разрешением проводить мониторинг атмосферы с учетом протекания мезомасштабных процессов.

Дополнить имеющиеся системы возможно автоматизированными сетями дистанционного мониторинга. Индикатором неоднородной структуры атмосферы можно считать индекс рефракции (приведенный коэффициент преломления) радиоволн [116,119]. Так как индекс рефракции зависит от ряда атмосферных параметров (температуры, влажности, электронной концентрации), то, зная индекс рефракции можно достаточно точно описать процессы, происходящие в атмосфере.

В настоящее время такие системы как NAVASTAR (GPS) и ГЛОНАСС все чаще входят в научную деятельность, их используют для целей дистанционного зондирования атмосферы [4, 6, 9, 13, 40, 41]. Эти системы представляют комплекс различных устройств, включающих в себя передающие спутники и приемную аппаратуру. Основные преимущества этой системы доступность, компактность, отработанная методика обработки сигналов. Немаловажным фактором актуальности исследования возможности мониторинга с использованием спутниковых навигационных систем цена таких комплексов, она намного ниже, чем цена сети автоматизированных станций, а временное и пространственное разрешение получаемых полей метеопараметров и атмосферных примесей в перспективе гораздо выше. На текущий момент в США и странах Европы сети приемников GPS встроены в систему метеорологического и климатического контроля. В России наземные сети приемников пока не использовались для исследования мезомасштабной структуры тропосферы.

Цель работы

Выявление закономерностей мезомасштабной пространственной структуры тропосферы, в том числе индекса рефракции дециметровых радиоволн, с помощью сети приемников спутниковых навигационных систем.

Задачи работы

- Разработка методики мониторинга мезомасштабной пространственной структуры тропосферы по данным сети наземных приемников GPS и ГЛОНАСС.
- Проведение эксперимента-синхронных измерений радиосигналов наземной сетью приемников, позволяющих исследовать закономерности мезомасштабной пространственной структуры тропосферы и ее изменчивости.
- Исследование изменчивости тропосферы в области β и γ - мезомасштабна основе наблюдений сети станций приемников GPS и ГЛОНАСС.

- Выявление закономерностей суточного хода горизонтальной структурной функции тропосферных задержек радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).
- Выявление сезонных вариаций временной структурной функции тропосферных задержек радиосигналов ГНСС.
- Оценка высотных вариаций горизонтальных структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн.

Методы исследования

Решение поставленных задач базируется на экспериментальном подходе, использующем длинные ряды синхронных радиоизмерений сети наземных навигационных приемников систем GPS и ГЛОНАСС. Исследуются ежесекундные измерения задержки дециметровых радиоволн в тропосфере. Анализ результатов проводится с помощью математического аппарата структурных функций.

На защиту выносятся

- С ростом размеров неоднородностей от 800 метров до 40 км структурные функции тропосферной задержки сигналов спутниковых навигационных систем растут от 0,01 до 0,06 м². Показатель аппроксимирующей степенной функции равен 0,6 – 0,8. Для масштабов неоднородностей от 0,8 до 45 км вклад ионосферной задержки в структурную функцию равен 0,0001-0,0006 м² а для тропосферной - 0,02-0,049 м².
- Величина пространственных структурных функций тропосферной задержки сигналов спутниковых навигационных систем достигает максимальных значений 0,06 м² в дневные часы. Показатель аппроксимирующей степенной функции максимален в дневное время и равен 0,7, а в утренние и вечерние часы показатель степени равен 0,1-0,2. В приземном слое максимальные значения структурной функции течение суток коррелируют с максимальным значением скорости ветра. Наиболее высоких значений временная

структурная функция тропосферной задержки сигналов спутниковых навигационных систем в $0,0018 \text{ м}^2$ достигает в летний период, а минимальные в $0,0003 \text{ м}^2$ - в зимний период.

- Для пространственных масштабов от 100 м до 14 км вклад неоднородностей в дисперсию индекса рефракции дециметровых радиоволн, обусловленный ростом размеров неоднородностей растет на всех высотных уровнях тропосферы. В приземном слое тропосферы получены максимальные значения структурной функции со структурной постоянной 1,72 и степенью 0,82 аппроксимирующей степенной функции.

Достоверность полученных результатов

- Достоверность 1-го защищаемого положения подтверждается сравнением выводов, следующих из экспериментальных данных, с результатами математического моделирования процессов распространения радиоволн на верифицированной модели (взаимная погрешность 10%); с учетом оценки доверительных интервалов для всех масштабов согласуются с 99% статистической значимостью;
- Достоверность 2-го положения подтверждается совпадением численных величин измерений тропосферной задержки сигналов ГНСС и тропосферной зенитной задержки по измерениям фотометров на верифицированной модели [43](взаимная погрешность менее 10% для всех масштабов).
- Достоверность 3-го защищаемого положения подтверждается сравнением с данными многолетних метеоизмерений. Верификация с помощью данных радиозонда, показали отклонения не больше 20% Подтверждаются результатами полученными в работах [66, 72]
- Достоверность экспериментальных данных подтверждается статистической обеспеченностью получаемых данных в более чем 2 миллиона измерений (ежесекундные синхронные фазовые измерения наземными

приемниками в течение 2008-2012. Достоверность обработки данных подтверждается учетом таких ошибок как многолучевость, несинхронность часов, влияние ионосферы; использованием математического аппарата, апробированного в научной литературе [77,89] и зарекомендовавшего себя как надежный.

Научная новизна

- Впервые создана методика количественной оценки мезомасштабных неоднородностей в пространственно разнесенных точках от 800 метров до 40 км с помощью радиосигналов спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС.
- Впервые по данным дистанционного радиозондирования сетью приемников ГНСС получены суточные вариации структурных функций тропосферной задержки радиоволн.
- Впервые по данным радиозондирования сетью приемников ГНСС получены сезонные вариации временных структурных функций тропосферной задержки радиоволн [100].
- Впервые получены высотные зависимости горизонтальной структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн.

Научная ценность защищаемых положений

Первое и второе положения дают представление о количественных характеристиках тропосферных неоднородностях в области пространственных масштабов от 0.8 до 40 км, об их суточной и сезонной изменчивости.

Третье положение дает представление о вариациях неоднородностей индекса рефракции радиоволн в области пространственных масштабов 100 м до 14 км, на различных высотах.

Практическая ценность работы

Полученные результаты уточняют и развивают метод дистанционного зондирования неоднородной структуры тропосферы. Методика оценки неодно-

родной мезомасштабной структуры тропосферы применима для исследований над другими территориями. При этом радиозондирование сигналами спутниковых навигационных систем способствует сокращению расходов на получение экспериментальных данных при увеличении временного разрешения. Обнаруженные зависимости и количественные оценки могут использоваться при разработке новых моделей мезомасштабных процессов в тропосфере, в том числе и для прогноза распространения радиоволн.

Автор принимал участие в качестве исполнителя в исследованиях, поддержанных: грантом молодых ученых Академии наук РФ 07-2/2008, госконтрактом № П162 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы», грантом Российского фонда фундаментальных исследований (№13-05-97054) и грантом Минобрнауки (соглашение № 8886).

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты и выводы получены автором в ходе работы по решению поставленных задач. Автор лично принимал участие в работах по созданию и эксплуатации сети приемников спутниковых навигационных систем, автоматизации наблюдений, сбору и анализу экспериментальных данных. Обработка данных зондирования для построения структурных функций выполнена по алгоритмам и программам, разработанным соискателем.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: международных симпозиумах «Атмосферная радиация и динамика», Санкт-Петербург, 2009, 2011, 2013 гг.; VI научной конференции «Промышленная экология и безопасность» Казань, 2009 г.; рабочих группах «Аэрозоли Сибири», Томск, 2009, 2010, 2011 и 2012 гг.; Второй Волжской региональной молодежной научной конференции «Радиофизические исследования природных сред и информационные системы», Казань, 2010; всероссийской научной конференции «Изме-

няющаяся окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований», Казань, 2010г.; XX и XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», 2008, 2011; международном симпозиуме «ProgressInElectromagneticResearch», Москва, 2012, международная конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» 2013 г., XIX Международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", г. Барнаул 2013 г.

Работа удостоена следующих наград

Диплом за лучший доклад на студенческой научно-практической конференции КГУ, Казань, 2009; диплом лауреата конкурса молодых ученых XVI рабочей группы "Аэрозоли Сибири", Томск, 2009, диплом конкурса молодых ученых XVIII рабочей группы "Аэрозоли Сибири", Томск, 2011.

Публикации

Автором опубликовано по теме диссертации 34 работ. Из них 18 статей в научных журналах (из них 5 в журналах, рекомендованных ВАК, 5 индексированы в базе SCOPUS), 2 статьи в сборниках трудов научных конференций, 14 опубликованных тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 130 страниц печатного текста, в том числе 32 рисунка, 8 таблиц. Список литературы содержит 120 источников.

Основное содержание диссертации

Во введении сформулированы актуальность темы, цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены атмосферные неоднородности различных масштабов: макромасштабные, мезомасштабные и микромасштабные. Показано, что из всего спектра неоднородностей наименее изучены неоднородности мезометеорологического масштаба с горизонтальными размерами от 2 до 2000 км, так как для их исследования требуются системы мониторинга атмосферы как с хорошим пространственным (до 1 км) так и временным разрешением (до 5 минут).

Дан обзор методов мониторинга атмосферных параметров, оказывающих влияние на распространение радиоволн. Показано, что радиозондирование атмосферы сигналами глобальных спутниковых навигационных систем позволяет проводить исследование тропосферы с хорошим временным разрешением (вплоть до ежесекундных измерений). Пространственное разрешение зависит от количества станций в сети и ее конфигурации.

Во второй главе описаны принципы исследования атмосферы по радиоизмерениям сети приемников ГНСС, даны спецификации и описание использованной аппаратуры. Построена сеть приемников ГНСС, разнесенных на расстояние от 1 до 35 км. Такое пространственное разрешение позволяет оценивать структуру тропосферы в области мезомасштабных процессов.

Рассмотрены основные погрешности, влияющие на расчет тропосферной задержки сигналов СНС. Показано что дифференциальные фазовые измерения позволяют компенсировать ошибки синхронизации часов приемников и спутников. Двухчастотные измерения позволяют исключить ионосферную задержку из фазовых измерений. Правильный выбор местоположения позволяет минимизировать ошибки многолучевости.

Получены оценки точности дифференциальных фазовых измерений радиосигналов ГНСС, которая равна 0,002 м. Описывается разработанный метод, позволяющий производить мониторинг тропосферной задержки радиоволн в области мезомасштабов.

Сравнение горизонтальной структуры тропосферной задержки радиоволн и ее суточной динамики с результатами численного моделирования показало их хорошее соответствие.

В третьей главе разработана методика построения структурной функции тропосферных задержек дециметровых радиоволн, полученные с помощью дистанционного зондирования тропосферы сигналами СНС ГЛОНАСС и GPS.

Показано что структурная функция и ее степенная аппроксимация является количественной характеристикой неоднородной структуры тропосферы. Значимый рост структурных функций в интервале горизонтальных масштабов от 800 м до 35 км свидетельствует о том, что растет вклад мезомасштабных неоднородностей в тропосферную задержку радиосигналов дециметрового диапазона.

Экспериментально показано, что на исследуемом масштабе неоднородностей от 0.8 до 46 км вклад ионосферной задержки дециметровых радиоволн в структурную функцию задержки радиоволн мал по сравнению с вкладом тропосферной.

Обнаружено, что в среднем за многолетний период влияние медленно развивающихся процессов относящихся к временным масштабам с длительностью более двух часов значительно и растет с увеличением длительности процесса.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты исследования тропосферы с помощью структурных функций тропосферных задержек радиоволн и индекса рефракции дециметровых радиоволн.

Оценка временных вариаций подтвердила, что структурная функция испытывает значительную изменчивость в зависимости от времени суток. Величина структурных функций тропосферной задержки достигает максимальных значений в дневные часы. Показатель аппроксимирующей степенной функции в дневное время максимален и равен 0,7. Для утренних и вечерних измерений показатель степени равен 0,1-0,2.

Такое поведение структурной функции означает, что в дневные часы увеличивается величина дисперсии индекса рефракции дециметровых радиоволн в го-

горизонтальном направлении в области масштабов от 1 до 35 километров. Максимальные значения структурной функции наблюдаются одновременно с максимальным значением скорости ветра в приземном слое в течение суток.

Оценка сезонных вариаций показала что наиболее высоких значений временная структурная функция тропосферной задержки в 0.0018 м^2 достигает в летний период измерений. Минимальные значения структурной функции 0.0003 м^2 - в зимний период.

Показано, что отмечается существенный рост горизонтальной структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн с увеличением масштаба неоднородностей. То есть, вклад неоднородностей в дисперсию индекса рефракции дециметровых радиоволн с ростом размеров неоднородностей на всех высотных уровнях тропосферы значим. Наибольшие значения структурной функции со структурной постоянной 1,72 и степенью 0,82 получены для приземного слоя.

В интервале масштабов неоднородностей от 1 до 6 км сравнение структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн в нижнем слое атмосферы по измерениям сети приемных станций СНС и многолетних метеоизмерений показывают хорошее согласие по величине структурных функций и по показателю степени аппроксимации, которые варьируются в пределах 0,6 – 0,8 для сети СНС и 0.5-0. 8 для сети станций атмосферного мониторинга.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Глава 1 Тропосферные неоднородности и методы их исследования

1.1 Классификация тропосферных неоднородностей по масштабам

Свойства атмосферы и ее параметры – температура, плотность, давление, режим циркуляции существенно меняются во времени и пространстве. Эти изменения различаются как по своему происхождению, так и по временным и пространственным масштабам, а также имеют широкий временной и пространственный спектр. Многообразие пространственно-временных характеристик полей атмосферных параметров – следствие совокупности множества факторов, определяющих ее энергетические и динамические свойства – радиационного баланса атмосферы, который зависит от излучения Солнца и альбедо поверхности, парникового эффекта [82]. Эффекты конвекции и горизонтальных градиентов температуры порождают вертикальные и горизонтальные движения, обусловленные стремлением восстановить термодинамическое равновесие, вызванное радиационным воздействием [118]. Контактное трение между подстилающей поверхностью и атмосферой формирует сдвиг скорости ветра и способствует формированию турбулентных вихрей, которые также участвуют в развитии атмосферных процессов [88,76]. Частицы воздуха находятся под действием сил различной природы. Во-первых, это силы обычной упругости, связанные со сжимаемостью воздуха. Во-вторых, это силы плавучести, обусловленные неоднородностью атмосферы по высоте, расслоением, или стратификацией. В-третьих, атмосфера обладает некоторой гироскопической жесткостью, реагируя на всякое возмущение появлением в ней колебательных движений [76,118].

Между подстилающей поверхностью и атмосферой существует непрерывный обмен теплом, влагой и примесями разного рода. В различных областях Зем-

ли под влиянием теплообмена с земной поверхностью формируются воздушные массы тропосферы с разными свойствами [82].

Вследствие гидродинамической неустойчивости среднего потока воздуха и волновых движений в атмосфере, происходит образование неоднородностей параметров среды. Эти движения формируют крупномасштабные неоднородности, которые, непрерывно разрушаясь, образуют все более мелкие [88,118].

Атмосферные движения, прежде всего, характеризуются своими пространственными и временными масштабами, на основе которых и разработана классификация неоднородностей, приведенная в [82, 118](см. Таблица 1. 1.1).

Таблица 1. 1.1 Классификация атмосферных неоднородностей по масштабам.

Обозначение	Характерный размер	Характерное время процессов
γ-микромасштаб	1 – 20 м	От доли секунды до десятков минут
β-микромасштаб	20 – 200м	Десятки секунд
α-микромасштаб	200– 2000 м	От минуты до десятков секунд
γ-мезомасштаб	2 – 20 км	От десятков минут до часов
β-мезомасштаб	20 – 200 км	От нескольких часов до суток
α-мезомасштаб	200 – 2000 км	до нескольких суток
β-макромасштаб	2000– 10 ⁴ км	Больше нескольких суток
α-макромасштаб	>10 ⁴ км	Неделя и более

Неоднородности атмосферы, складываются из совокупности неупорядоченных "вихрей" различных размеров и скоростей. Самые крупные вихри образуются в результате неустойчивости основного течения. В свою очередь эти вихри

разрушаются и порождают возмущения второго порядка, меньшего размера. При этом происходит передача энергии от возмущений большего размера к возмущениям меньшего размера. Возмущения второго порядка порождают более мелкие возмущения и так далее [73].

Из наиболее очевидных свойств атмосферы является ее малые размеры по вертикали по сравнению с размерами по горизонтали, что связано с гравитационным эффектом. Эта асимметрия сказывается и на характеристиках скорости. Вертикальные скорости, соответствующие синоптическим масштабам, имеют порядок см/сек, в то время как характерное значение горизонтальной скорости 10 м/сек [76].

По мере перехода к более мелким масштабам, при стратификации, близкой к безразличной или устойчивой, анизотропия постепенно исчезает. Вообще, если масштаб движения меньше, чем высота над земной поверхностью или расстояние до ближайшей инверсии, движения являются в основном изотропными. Поскольку анизотропия становится более резко выраженной при переходе к большим масштабам, спектры вертикальной компоненты скорости закономерно отличаются от спектра горизонтальных компонент тем, что имеют пренебрежимо малые амплитуды на частотах, меньше приблизительно 5 цикл/час. Только в случае сильной термической конвекции возможны большие амплитуды низкочастотных компонент вертикальной скорости [76].

Анизотропия уменьшается не только с увеличением частоты, но и с увеличением расстояния от земной поверхности или какой-либо другой границы.

1.2 Макромасштабные неоднородности

Макромасштабные неоднородности это вариации с пространственными размерами в тысячи км, которые хорошо заметны на фоне сезонных и климатических процессов. Они связаны с сезонными изменениями термического режима

тропосферы над континентами, крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана. Выделение четырех сезонов соответствует изменением в годовом цикле приходящего солнечного излучения. Причиной макромасштабных неоднородностей бывают планетарные волны синоптических масштабов, бароклинная и комбинационные неустойчивости [83, 118].

Крупномасштабные неоднородности представляют в виде суммы зональных гармоник, причем на высотах средней атмосферы (15 - 110 км) существенный вклад в долготные вариации вносят, только гармоники с малыми зональными волновыми числами, так называемые планетарные волны. Атмосферные волны глобального масштаба могут быть классифицированы по различным признакам: источники возбуждения (вынужденные и свободные колебания атмосферы); возвращающие силы, отвечающие за возникновение колебаний (инерционные и гравитационные волны, циклоны и антициклоны); горизонтальные (зональные) фазовые скорости (стационарные и бегущие на восток или запад волны); условия распространения (вертикально распространяющиеся внутренние и затухающие внешние волны); широтная структура (симметричные и антисимметричные относительно экватора моды, экваториально захваченные и внетропические волны) и т. д. Атмосферные приливы, которые возбуждаются главным образом за счет суточных вариаций нагрева атмосферы при поглощении солнечной радиации, обычно выделяются в отдельную группу. Атмосферные волны глобального масштаба разделяются на планетарные волны с произвольными периодами колебаний и атмосферные приливы, т. е. глобальные колебания атмосферы с частотами кратными частоте вращения Земли [76, 118]. Следует, однако, отметить, что данное выше определение планетарных волн является более общим, включающим в себя атмосферные приливы как частный случай.

В атмосфере всегда наблюдается постоянное присутствие волновых возмущений глобального масштаба. Фундаментальным свойством атмосферных (в том числе планетарных) волн является то, что при распространении из нижней атмосферы в вышележащие слои они переносят энергию и импульс [62, 76, 82].

Подвергающиеся диссипации на высотах средней атмосферы и термосферы, волны передают переносимые энергию и импульс среде, воздействуя тем самым на тепловой баланс и среднюю зональную циркуляцию атмосферы. Таким образом, процесс распространения и диссипации атмосферных волн является одним из основных механизмов, отвечающих за энергетическое и динамическое взаимодействие различных слоев атмосферы [62, 82].

Характерной особенностью средней атмосферы Земли является существенная долготная неоднородность (особенно в зимний период) климатических распределений метеорологических параметров в стратосфере [82]. Обычно эти квазистационарные долготные неоднородности аппроксимируются суммой зональных гармоник, причем на высотах стратосферы и мезосферы значимый вклад в долготные изменения вносят только крупномасштабные гармоники с малыми зональными волновыми числами, получившие название стационарных планетарных волн [83, 98] - под стационарностью понимается неподвижность этих гармоник относительно земной поверхности.

Примером неоднородностей глобального масштаба могут служить волны Россби, низкочастотные, преимущественно горизонтальные волнообразные движения, обусловленные вращением и сферичностью Земли; проявляются в виде перемещающихся систем течений [57]. Характерные периоды этих волн значительно превышают маятниковые сутки, их длина колеблется в пределах от нескольких десятков до нескольких тысяч километров, горизонтальные амплитуды при определенных условиях могут достигнуть несколько сот километров. Соответствующие скорости течения имеют порядок 1 -10 см/с [57,76]. При определенных условиях они теряют динамическую устойчивость, трансформируясь в синоптические вихри [118].

Обусловленные силой Кориолиса и ее неоднородностью вдоль меридиана длинноволновые возмущения в нижних широтах представляют собой волны Россби (планетарные волны), на нелинейной стадии, поддерживающие или создающие зональные (вдоль широты) течения, а в средних широтах - регулярно че-

редующиеся циклонические и антициклонические вихри Россби, ротор скорости которых параллелен или антипараллелен вектору локальной угловой скорости вращения системы соответственно. В циклонах сила Кориолиса направлена от центра вихря, поэтому в нем образуется понижение, а в антициклонах, наоборот, повышение плотности газа. Антициклоны имеют значительно более продолжительное время жизни, чем циклоны, что связано с особенностями дисперсии (заметим попутно, что из-за повышения плотности при прочих равных условиях суммарный угловой момент антициклона оказывается выше, чем у циклона, поэтому ему труднее разрушаться) [82,118].

При описании крупномасштабных атмосферных процессов, особенно в задачах динамической метеорологии используются приближения идеальной жидкости. Гидростатическое и квазигеострофическое приближения часто используются как для теоретического исследования, так и в процедурах усвоения данных. Источником данных о макромасштабных неоднородностях служит информация, полученная с метеорологических радиозондов, доплеровских радаров и спутниковые измерения.

Поскольку макромасштабные неоднородности участвуют в погодообразующих процессах, то данный тип атмосферных неоднородностей достаточно хорошо изучен [18,45,57,62, 82, 118]. При исследовании макромасштабных процессов возникают сложности в сборе и обработке информации. Существующие различные интерполяционные и экстраполяционные методы, позволяют полностью или частично устранить эти недостатки, но при этом опускаются многие важные подробности о неоднородностях менее крупного размера.

1.3 Микромасштабные неоднородности

Микромасштабными неоднородностями, согласно классификации [118] считаются процессы с горизонтальными размерами менее 2000 метров. Неоднородности микромасштаба (Таблица 1. 1.1) возникают при турбулентности, конвек-

тивной неустойчивости, неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, внутренних гравитационных волнах (ВГВ), неустойчивости Релея. Так как на данном масштабе осуществляется переход от турбулентного режима к ламинарному режиму течения воздуха, то вводят специальный коэффициент называемый числом Рейнольдса как критерий перехода. Число Рейнольдса есть отношение сил инерции, действующих в потоке, к силам вязкости $R_e = V_{cp} \times l / \eta$, где V_{cp} - скорость основного течения, η - кинематическая вязкость [73, 88].

Турбулентные неоднородности появляются следующим образом. Самые крупные вихри образуются в результате неустойчивости основного течения (их размеры L_0 сопоставимы с размерами течения), при числе Рейнольдса больше критического $R_{екр}$.

В свою очередь эти вихри, из-за своего большого числа Рейнольдса, разрушаются и порождают возмущения второго порядка, меньшего размера. При этом происходит передача энергии от возмущений большего размера к возмущениям меньшего размера. Возмущения второго порядка порождают более мелкие возмущения и так далее (появление новых вихрей все меньших и меньших размеров). Минимальный размер возмущений l_0 . После достижения своего минимального размера, они распадаются за счет молекулярных диффузионных процессов [73].

В результате в нижнем (приземном) слое происходит интенсивное перемешивание воздуха. Скорость воздушных потоков в каждой точке является случайной функцией времени. Это подтверждается, например, оптическим явлением мерцания звезд, свет от которых рассеивается на случайных областях с повышенной и пониженной плотностью атмосферы [64]. Это явление аналогично дрожанию и искажению объектов, наблюдаемых через пространство с сильным испарением воды после дождя в теплую погоду или бензина на автозаправочных станциях. Вариации скорости в потоках атмосферы также являются турбулентными, поэтому описание движения атмосферы требует статистического подхода. Осуществить в полном объеме такое описание невозможно. Очень плодотворным является

представление турбулентных потоков в виде совокупности вихрей от величины $l_0 \sim 1$ мм до величины $L_0 \sim 1$ метр (количественные величины относятся к приземному слою). Эти величины носят название внутреннего и внешнего масштабов турбулентности, причем оба масштаба возрастают при удалении от поверхности Земли [89, 90].

Для внешнего масштаба тропосферных неоднородностей L_0 на основании литературных данных может быть принята лишь оценочная величина. Для так называемых мелкомасштабных неоднородностей, которые обычно считаются изотропными, описываются законом двух третей, величина внешнего масштаба составляет около 100 м. [89, 90]. Внутренний масштаб неоднородностей l_0 оценивается величиной от нескольких миллиметров до сантиметра. Внутренний масштаб возникает как результат последовательного распада больших, но неустойчивых вихрей на более мелкие, которые, в свою очередь распадаются дальше вплоть до вихрей размером порядка нескольких миллиметров [76].

Следующим основным свойством спектров турбулентности является их чувствительность к изменениям стратификации в области длин волн около 500 м. Энергия, приходящаяся на эту область частот, оказывается пониженной, в особенности у поперечной и вертикальной флуктуации скорости. Поскольку это понижение менее резко выражено у продольной компоненты скорости, при устойчивой стратификации возникает анизотропия в горизонтальной плоскости, проявляющаяся в том, что турбулентные вихри оказываются вытянутыми вдоль направления движения.

Данный тип атмосферных неоднородностей подробно изучен, в том числе и радиометодами [34, 54, 69, 73, 78].

1.4 Мезомасштабные неоднородности

Мезомасштабными неоднородностями называются процессы с горизонтальными размерами от 2 до 2000 км. Они являются одними из наименее изученных и сложных в описании процессов. Основные причины возникновения неоднородностей это, инерционная неустойчивость, внутренние гравитационные волны, неустойчивые волны Кельвина — Гельмгольца и упорядоченная конвекция в атмосфере [118].

Сложность в моделировании процессов данного типа возникает как из-за вклада более крупных процессов, так и их сильной зависимостью от типа подстилающей поверхности. В этом случае часто говорят о планетарном пограничном слое. Планетарным пограничным слоем (ППС) называют нижний слой тропосферы, в пределах которого на величину и направление скорости воздушных потоков влияет расстояние до подстилающей поверхности [61].

Традиционный подход к параметризации процессов в ППС существенно ограничен ввиду наличия крупномасштабных (сравнимых и превосходящих по размеру толщину ППС) квазиупорядоченных циркуляций (крупных конвективных ячеек и конвективных валиков, спиралевидных протяженных вихрей различной природы), определяющих значительную, а в некоторых случаях и основную часть интегрального переноса импульса, тепла и влаги по вертикали. Крупномасштабные квазиупорядоченные структуры характерны как для чисто конвективного ППС, перемешивание, в котором происходит за счет сил плавучести, так и для нейтрально-стратифицированных и слабо-неустойчивых пограничных слоев, генерация турбулентной энергии в которых определяется сдвигом средней скорости ветра. При наличии крупномасштабных циркуляций потоки тепла, импульса и влаги внутри ППС могут не зависеть напрямую от локальных значений соответствующих градиентов. Так, например, явление противогradientного переноса тепла в конвективном ППС известно достаточно давно [61, 118]. В тех случаях, когда подстилающая поверхность насыщена влагой или является морской поверхностью, крупномасштабные циркуляции в ППС становятся видимыми за счет обра-

зования слоисто-кучевой облачности на верхней границе ППС в местах восходящих крупномасштабных течений. Зимой при натекании холодных воздушных масс с материка на теплую поверхность моря в ППС наблюдаются протяженные облачные гряды, связанные с горизонтальными конвективными валиками, которые затем трансформируются в нерегулярные конвективные ячейки, часто имеющие форму многоугольников. Различают открытые (облачность сосредоточена на периферии ячеек) и закрытые (полностью покрытые облачностью) конвективные ячейки. От типа ячеек, их размера и структуры существенно зависят альbedo облакови суммарный радиационный баланс в нижнем слое атмосферы; процессы конденсации и испарения существенно влияют на динамику ППС за счет изменения плавучести [79]. Таким образом, изучение структуры и динамики мезомасштабных вихрей является важным направлением физики атмосферы, необходимым для правильного описания процессов турбулентного обмена.

О наличии внутренних волн или упорядоченной конвекции можно судить либо по появлению облаков характерных форм (регулярные структуры в виде полос или ячеек), либо по данным измерений с высоким разрешением, либо по реакции летательных аппаратов [79]. Известно, что мезомасштабные процессы оказывают влияние на чрезвычайные стихийные явления, такие как ураганы, торнадо, градообразование [40, 35, 79].

На этих масштабах, кроме упорядоченных движений типа внутренних волн или конвективных ячеек, и турбулентных движений могут наблюдаться и переходные состояния (разрушение внутренних волн или ячеек с образованием зон неупорядоченного перемешивания) и суперпозиция движений, одни из которых ламинарны (упорядочены), другие турбулентны. Если волны (или конвективные ячейки) достаточно интенсивны, то при соответствующем разрешении данных они хорошо видны непосредственно на реализациях. Однако в тех случаях, когда упорядоченные движения выражены плохо, возникают существенные трудности, связанные с разделением волновых и турбулентных движений в атмосфере. [118]. В этом случае определяющим параметром будет служить вертикальный градиент

температуры: периодические движения в статистически вертикально-неустойчивой среде являются конвективными, а в статистически устойчивой, волновыми [118].

Наиболее известным примером атмосферных волн являются подветренные волны, возникающие при обтекании горных хребтов, островов и других достаточно крупных препятствий. Такие волны часто хорошо видны благодаря наличию соответствующих форм облачности. Поэтому параметры волн (длину, фазовую скорость) довольно легко измерить. В установившемся режиме эти волны являются стационарными (не смещаются относительно неровностей рельефа). Подветренные волны наблюдаются в слоях большой вертикальной мощности и нередко проникают в стратосферу.

В работах [66,67] показано, что даже слабые орографически неоднородности, характерные для Европейской территории России могут влиять на формирование волновых процессов в метеопараметрах.

Движения неоднородностей мезомасштаба вследствие воздействия друг с другом и другими неоднородностями формирует режим, для которого характерны процессы интенсивного обмена свойствами в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Подвижные квазидвумерные вихри оказывают значительное влияние на циркуляцию атмосферы. Влияние этих вихрей с относительно небольшой продолжительностью жизни можно представить как «макروتурбулентное трение». Можно ввести и соответствующие коэффициенты вязкости и теплопроводности по аналогии с мелкомасштабной турбулентностью [88, 90.93].

Необходимо иметь в виду, что заметны вариации параметров турбулентности в зависимости от времени суток, сезона и динамики атмосферы. Практически все параметры меняются с высотой.

Анализ экспериментальных данных [32, 70, 72,91, 94, 96] показывает существенные мезомасштабные пространственно-временные вариации большинства атмосферных параметров, включая метеопараметры, концентрации малых газовых примесей и индекса рефракции дециметровых радиоволн.

Пространственная неоднородная структура атмосферных параметров имеет существенную анизотропию в вертикальном и горизонтальном направлениях. Поскольку мезометеорологические процессы более быстрые по сравнению с макромасштабными, классические методы исследования или неэффективны или слишком затратны. Для их исследования требуется использование современных средств мониторинга с хорошим пространственным и временным разрешением.

1.5 Мониторинг атмосферных параметров, в том числе радиометодами

Методов исследования атмосферы существует много: прямые измерения атмосферных параметров с помощью радиозондов и ракет, оптическое зондирование - лучом лазера, акустическое (звуком), радиолокационное и др. [12, 17, 33, 56, 80, 82, 97, 69, 71].

Обычно используют метод мониторинга атмосферы с помощью радиозондов - миниатюрных метеостанций, поднимаемых до высоты 30-40 км шарами, наполненными водородом или гелием [82, 83]. Температура измеряется - термисторами (реже биметаллическими деформационными термометрами), давлением мембранными манометрами, влажность - плёночными или электрохимическими гигрометрами. Радиозонд непрерывно передаёт по радио результаты измерений, регистрируемые в пункте выпуска. Выпуски радиозондов производятся ежедневно несколько раз в сутки в строго определенное время. Результаты зондирования, проводимого более чем в 800 пунктах радиозондирования в разных географических районах, являются основными исходными материалами для составления прогноза погоды [82]. Для научно-исследовательских целей наряду с массовыми радиозондами периодически поднимаются специальные радиозонды, измеряющие состав атмосферы, радиационные потоки и т. д. Однако, сейчас явно недостаточно экспериментальных исследований изменчивости атмосферы, и, соответственно, ее влияния на распространение радиоволн. Аэрологические эксперименты проводят-

ся один или два раза в сутки, что не дает статистически надежных результатов с одной стороны, и физических характеристик атмосферы с периодами менее суток, с другой. Имеются и другие недостатки.

При акустическом зондировании определяется распределение температуры и ветра по измерениям времени и направления прихода звуковых волн отраженных от температурных неоднородностей [84]. Активно проводятся исследования с помощью доплеровских лидаров и радиотелескопов [65, 56].

Наряду с наземными средствами мониторинга атмосферы, существуют методы с использованием космических технологий. Существуют специальные метеорологические спутники, позволяющие дистанционно зондировать атмосферу. Можно отметить радиозатменный метод мониторинга стратосферы и ионосферы [12, 39, 71]. С его помощью можно определить наличие атмосферы и ионосферы у планеты, химический состав атмосферы, ее плотность, температуру, наличие турбулентности. Радиозатменный метод основан на следующих эффектах. Низкоорбитальный спутник измеряет амплитуды и фазы сигналов спутниковых навигационных систем. Если космический аппарат заходит за планету и затем выходит из-за нее, то лучевая линия спутник-спутник «сканирует» вертикальную структуру атмосферы. Под влиянием атмосферы планеты происходят изменения амплитуды и фазы радиоволн. Эти эффекты регистрируются и дают информацию об атмосфере и ионосфере в конкретных районах планеты [81, 12, 39]. В работе [71] проанализирована возможность мониторинга флуктуаций плотности или температуры в стратосфере по данным радиозатменных измерений амплитуды сигнала на трассах спутник - спутник в сантиметровом диапазоне длин волн, показано, что основной вклад во флуктуации амплитуды радиоволн в стратосфере вносят анизотропные неоднородности, соответствующие модели насыщенных внутренних гравитационных волн.

Различают прямую и обратную задачи радиопросвечивания. Прямая задача предполагает, что задана модель атмосферы, и нужно найти для данной траектории аппарата изменение амплитуды, частоты и фазы радиоволн. [87, 119]. Об-

ратная задача состоит в том, чтобы по амплитуде, частоте и фазе радиоволны восстановить структуру атмосферы [51, 69, 74].

Можно считать, что теоретические вопросы наземного мониторинга рассмотрены достаточно полно. Несмотря на то, что в России работают службы, регулярно осуществляющие мониторинг воздушного бассейна, как с помощью наземных станций, так и с помощью спутникового зондирования, большие территории часто не охвачены регулярными наблюдениями. Наземные эксперименты часто проводятся эпизодично, что не дает статистически надежных результатов. Зондирование приземного слоя с космических аппаратов и аэрологические данные не позволяют с высоким временным разрешением проводить мониторинг атмосферы с учетом протекания внутрисуточных процессов [54, 8, 30].

Современные системы мониторинга атмосферы должны иметь такие качества как надежность, простота и экономичность эксплуатации при высоком временном и пространственном разрешении [92].

Горизонтальное зондирование проводится эпизодически в научно-исследовательских целях или для разведки погоды доплеровскими радарными некогерентного рассеяния. Приборы поднимаются на автоматических аэростатах, дрейфующих длительное время на заданных высотах и автоматически передающих по радио результаты измерений. Горизонтальное зондирование атмосферы производится также на самолетах, оборудованных бортовой самопишущей аппаратурой, во время полета иногда производится также аэрофотосъемка облаков [83, 79].

Для многих задач спутникового радиозондирования атмосферы и земной поверхности представляет интерес всестороннее исследование возмущения, которое оказывает неоднородная структура реальной атмосферы на распространение радиоволн по различным трассам [52, 54, 60, 66]. В настоящее время достаточно хорошо известно влияние неоднородностей турбулентных масштабов, некоторые работы подтверждают влияние крупномасштабных неоднородностей на радиоизмерения [72, 89, 119].

Однако зондирование приземного слоя с космических аппаратов, ракетные и аэрологические данные не позволяют с высоким временным разрешением проводить мониторинг атмосферы с учетом протекания внутрисуточных термодинамических процессов.

Одним из перспективнейших направлений мониторинга неоднородной структуры тропосферы является использование сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС). В США, Японии, Западной Европе достаточно много исследований посвящено измерениям вариаций трехмерных полей содержания водяного пара в тропосфере с помощью сетей наземных приемников GPS- [1-7,9-13, 17,3638,46] и др. В 1999 году в США недалеко от города Ламаунт была построена сеть из 25 автоматических станций на площади около 100 км². Эти станции состояли из одночастотных GPS приемников для сбора данных, компьютера для предварительной обработки, радиомодема для передачи в научный центр. Эта система была построена для трехмерной томографии водяного пара [41]. Этот опыт показал, что сигналы ГНСС возможно использовать для исследования атмосферных процессов. Приемники GPS используют для изучения концентрации водяного пара, как в региональном, так и глобальном масштабе, в зависимости от количества и конфигурации используемой сети. Использование с помощью приемников ГНСС позволяет проводить атмосферные исследования с хорошим временным разрешением вплоть до ежесекундных измерений. На ряде территорий построены постоянно функционирующие сети приемников ГНСС, например, на Гавайях, Швейцарии, Японии и Канаде, каждая из которых насчитывает более десятка станций. Особенно стоит отметить что, в США объединение университетов при поддержке государства создало сеть SuomiNet покрывающая большую часть континентальных штатов Америки, которая позволяет получать данные о состоянии ионосферы и тропосферной влажности в реальном времени [38, 47,50]. Данная сеть не только позволяет проводить континентальное исследование распространения водяного пара, но также имеет широкие перспективы в других областях, например исследование ионосферы, прибрежная метеорология

или региональная климатология. Также планируется объединения системы не только с другими сетями на территории США, но и сетями в других странах. Данная особенность позволяет объединять результаты региональных исследований, что позволит создавать модели атмосферы в масштабах всей Земли. Данные GPS-мониторинга имеют хорошую перспективу усвоения в численных моделях прогноза погоды [8, 13,35].

В России ГНСС используются для томографии ионосферы и стратосферы [85, 74], появляются работы по мониторингу влагосодержания [59,117], но практически не используются для исследования мезомасштабной структуры тропосферы.

1.6 Выводы

Рассмотрены атмосферные неоднородности различных масштабов: макромасштабные, мезомасштабные и микромасштабные. Показано, что из всего спектра неоднородностей наименее изучены неоднородности мезометеорологического масштаба с горизонтальными размерами от 2 до 2000 км, так как для их исследования требуются системы мониторинга атмосферы как с хорошим пространственным (до 1 км) так и временным разрешением (до 5 минут).

Дан обзор методов мониторинга атмосферных параметров. Показано, что радиозондирование атмосферы сигналами глобальных спутниковых навигационных систем позволяет проводить исследование тропосферы с хорошим временным разрешением (вплоть до ежесекундных измерений). Пространственное разрешение зависит от количества станций в сети и ее конфигурации.

Глава 2 Методика дистанционного радиозондирования тропосферы сетью наземных приемников ГНСС

2.1 Эксперимент на сети приемников ГНСС

В главе 1 показано, что в настоящее время наиболее перспективным направлением мониторинга неоднородной структуры тропосферы является ее дистанционное радиозондирование с использованием спутников систем GPS и ГЛОНАСС. Данная глава посвящена методическим и теоретическим аспектам использования радиосигналов ГНСС для дистанционного зондирования атмосферы. Метод исследования атмосферы с помощью наземного оборудования систем ГНСС основан на том, что на радиосигналы оказывается влияние со стороны неоднородной атмосферы Земли.

Для решения задачи исследования неоднородной структуры атмосферы в Казанском университете построена сеть наземных пространственно-разнесенных высокоточных приемников систем GPS - ГЛОНАСС, которая позволяет оценить поле индекса рефракции дециметровых радиоволн с помощью параметров принятых радиосигналов с космических аппаратов. На Рис.2.1 Представлена одна из конфигураций сети использованная для мониторинга атмосферы.

Сеть состоит из однотипных приемников NovatelSmartAntennaSSII/V1 и NovatelOEMV-3 [37, 46]. Ниже (см. Таблица2.1) представлены технические характеристики приемников.

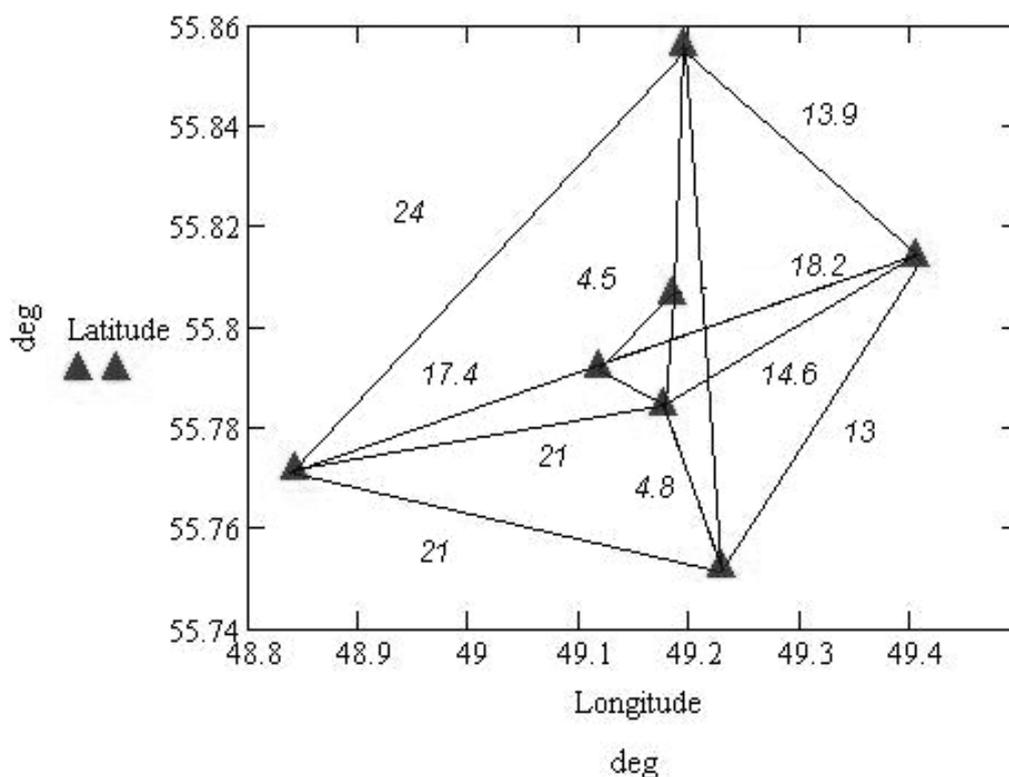


Рис.2.1 Расположение сети приемных станций ГНСС GPS – ГЛОНАСС в г. Казань, цифрами обозначены расстояния между станциями в км.

Каждый приемник способен ежесекундно (некоторые до 20 раз в секунду) принимать сигнал с целого созвездия спутников ГЛОНАСС и GPS, находящихся в его прямой видимости.

При прохождении атмосферы Земли радиоизлучение от спутника попадает в среду с изменяющимся показателем преломления. На больших расстояниях от поверхности Земли (в безвоздушном пространстве) показатель преломления n равен 1 и скорость радиоволны равна скорости света в вакууме. В атмосфере показатель преломления уже не равен 1 и меняется в зависимости от плотности воздуха [119].

Таблица 2.1 Технические характеристики аппаратуры используемой в исследованиях [37, 46]

Технические характеристики приемников SSII/ V1	Технические характеристики приемников OEMV-3
<p>односистемный</p> <p>одночастотный, рабочая частота</p> <p>L1 = 1575. 42 МГц</p> <p>12 каналов слежения</p> <p>Минимальная чувствительность -135 Дб</p> <p>Точность измерений:</p> <p style="padding-left: 40px;">Дальность по C/A коду - 6 см</p> <p style="padding-left: 40px;">Фаза несущей - 0. 75мм</p> <p>Технология подавления многолучевости</p> <p>Частота выдачи измерений и координат 1Гц</p> <p>Напряжение питания 12 В</p> <p>Энергопотребление 1. 2 Вт</p> <p>Диапазон рабочих температур</p> <p>-40°С до +75°С</p>	<p>двухсистемный</p> <p>двухчастотный, рабочая частота</p> <p>1575. 42 МГц и 1227. 6МГц</p> <p>72 каналов слежения</p> <p>Минимальная чувствительность – 135 Дб</p> <p>Точность измерений :</p> <p style="padding-left: 40px;">Дальность по C/A коду - 6 см</p> <p style="padding-left: 40px;">Фаза несущей - 0. 75мм</p> <p>Технология подавления многолучевости</p> <p>Частота выдачи измерений и координат 20Гц</p> <p>Напряжение питания 12 В</p> <p>Энергопотребление 1. 2 Вт</p> <p>Диапазон рабочих температур</p> <p>-40°С до +75°С</p>

Показатель преломления зависит от плотности воздуха, меняющейся вдоль траектории луча волны. Так как точный закон изменения плотности с высотой не известен, то точное определение величины рефракции невозможно. В оптическом диапазоне рефракция является одним из главных факторов, ограничивающих точ-

ность позиционных наблюдений. Так как наблюдения проводятся в радиодиапазоне (осуществляется прием сигналов со спутников), то применяются специальные методы учета радиорефракции. Так как глобальные навигационные системы GPS и ГЛОНАСС составляют основу современных астрометрических и геодезических сетей, методам учета радиорефракции посвящено значительное количество научных работ [1-13, 51, 53, 54].

Рассмотрим особенности радиорефракции. Преломление радиоволн и их скорость различны при распространении в ионизированной среде (в ионосфере Земли) или нейтральной среде (в тропосфере Земли). Преломление в стратосфере можно не учитывать в силу ее незначительного влияния на рефракцию вследствие малой плотности стратосферы, отсутствия водяного пара и ионизации [116, 120]. Поэтому, для учета влияния атмосферы на точные позиционные наблюдения в радиодиапазоне необходимо учесть вклад ионосферы и тропосферы на распространение радиоволн.

Рефракция в радионаблюдениях сводится не только к изменению направления на источник, но и к изменению длины пути луча в атмосфере (или, по-другому, к набегу фазы).

Расстояние между космическим аппаратом и приемным пунктом L измеряют с помощью модулированных сигналов путем определения времени распространения радиоволн Δt [11,13].

$$L = c \cdot \Delta t, \tag{2. 1}$$

где c — скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

В связи с возможностью высокоточных измерений интервала времени можно определить расстояние L с высокой точностью. Однако атмосфера и ионосфера Земли вносит заметную погрешность при определении дальности. Этот эффект связан с тем, что скорость распространения радиоволн в атмосфере и ионосфере отличается от значения c и лучевые линии искривлены. В связи с этим ис-

тинное расстояние между передающим и приемными пунктами L_0 будет отличаться от измеренного на величину ΔL .

Необходимость учета влияния тропосферы и ионосферы на измерение расстояния возникает при высокоточных определениях траектории спутника и при навигационных определениях координат наземных объектов по сигналам спутников. Дополнительный набег фазы зависит от состояния ионосферы и тропосферы в пунктах наблюдения, которое определяется как временем года и суток, так и локальными условиями. Незнание количества свободных электронов на пути волны в ионосфере и содержания водяного пара в нижних слоях атмосферы определяет ошибки вычисления задержки ΔL . Еще большие требования к точности измерения расстояния предъявляются при геодезических определениях координат по сигналам навигационных спутников [15,38, 86]. В службе точного времени сигналы спутников используются для синхронизации часов в далеко разнесенных пунктах, при этом также следует учитывать запаздывание при распространении радиоволн через атмосферу и ионосферу Земли. Анализ ошибок при определении дальности, обусловленных влиянием тропосферы и ионосферы, будет проведен ниже.

Кажущееся расстояние L до объекта – источника радиосигнала, находящегося на расстоянии H от приемника, найденное вдоль искривленной лучевой линии определится выражением

$$L = c \int v_g^{-1} dl \quad (2. 2)$$

Здесь v_g — групповая скорость распространения радиоволн, dl — элемент длины на искривленной лучевой линии. Интеграл взят по трассе распространения. Фазовый путь радиосигнала

$$L = c \int_S v_\phi^{-1} dl$$

Здесь v_ϕ — фазовая скорость распространения радиоволн, dl — элемент длины на искривленной лучевой линии. Истинное расстояние между передатчиком и приемником есть

$$L_0 = \int_S dl_0 \quad (2.3)$$

Кажущееся увеличение расстояния ΔL при его определении радиотехническими методами в соответствии с (2.2) и (2.3) будет равно

$$\Delta L = L - L_0 = \int_S N(h) \cdot 10^{-6} dl + \left(\int_S dl - \int_S dl_0 \right),$$

Коэффициент преломления радиоволн в атмосфере мало отличается от единицы, поэтому введен приведенный коэффициент преломления N (индекс рефракции радиоволн), определяемый соотношением [119]

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6} \quad (2.4)$$

Разность двух последних интегралов пренебрежимо мала, по сравнению с первым членом, поэтому можно считать, что

$$\Delta L = \int_S N(h) \cdot 10^{-6} dl \quad (2.5)$$

Рассмотрим характер зависимости $N(h)$ для ионосферы и тропосферы подробнее.

Коэффициент преломления зависит сложным образом от высоты, в связи с этим лучевые линии радиоволн искривляются в основном в вертикальной плоскости [119]. Направление изгиба описывается знаком производной, так как луч искривляется в сторону среды с более высоким значением коэффициента преломления. В тропосфере луч искривляется в направлении к земной поверхности, а на

стратосферном участкерефракция практически отсутствует. В нижней части ионосферы, где электронная концентрация возрастает, а коэффициент преломления уменьшается при увеличении высоты, искривление лучевой линии происходит также в сторону земной поверхности. Выше главного ионосферного максимума-лучевая линия искривляется в противоположную сторону.

Измерения двухчастотного многоканального приемника ГНСС, для j -го спутника можно записать как [13, 44]:

$$P_{j,1} = \rho_{0,j} + I_j + \Delta T_j + \xi_j \quad (2.6)$$

$$P_{j,2} = \rho_{0,j} + I \frac{f_1^2}{f_2^2} + \Delta T_j + o_j \quad (2.7)$$

$$\varphi_{j,1} = \rho_{0,j} - I_j + \Delta T_j + N_j \lambda_1 + \xi_j \quad (2.8)$$

$$\varphi_{j,2} = \rho_{0,j} - I_j \frac{f_1^2}{f_2^2} + \Delta T_j + N_j \lambda_2 + \xi_j \quad (2.9)$$

P – псевдодальности для двух частот(групповые пути радиосигналов от спутника до приемника, измеренные по времени распространения); φ – фазовые измерения (фазовые пути радиосигналов от спутника до приемника, оцененные по фазе принятого сигнала), $\rho_{0,j}$ – истинное расстояние, I – ионосферная задержка, ΔT – тропосферная задержка, ξ – прочие ошибки, в том числе обусловленные ошибками часов приемника и спутника, $N\lambda$ – фазовые неоднозначности, f_1, f_2 –частоты радиосигналов СНС.

2.2 Исключение ошибок измерений и оценка точности фазовых измерений в эксперименте

Во время проведения измерений большую роль играет учет различных типов погрешностей. В случае тропосферы среда, через которую распространяются волны, не обладает дисперсией, и все гармонические волны распространяются с

одной и той же фазовой скоростью, пакет волн ведет себя как монохроматическая волна - его групповая скорость равна фазовой, отклонения и задержки радиоволн возникают только в случае встречи с неоднородностью атмосферных параметров. В реальных условиях на точность измерений влияет множество факторов. Источники возникновения погрешности измерения фазы и псевдодальности можно разделить на три группы по их происхождению [13,120]:

- а) погрешности, вносимые оборудованием навигационного спутника;
- б) погрешности, вносимые приемником;
- с) погрешности, возникающие на радиотрассе;

Первые две группы погрешностей обусловлены, в основном, неидеальностью радиотехнического оборудования спутника и приемника.

2.2.1 Погрешности частотно-временного обеспечения

Погрешности частотно-временного обеспечения зависят от стабильности бортового эталона частоты (атомные часы). Среднеквадратическое отклонение сдвига бортовой шкалы через сутки после коррекции составляет 25, 4 нс для цезиевых и 108 нс для рубидиевых эталонов частоты. Требования к СНС таковы, что СКО сдвига бортовой шкалы должно быть не более 10 нс [86,120].

Кроме аппаратных методов повышения стабильности шкалы, применяются алгоритмические методы, основанные на известных математических моделях поведения бортовых эталонов, и позволяющие прогнозировать отклонение. Непрогнозируемые отклонения бортовой шкалы времени относительно системной могут достигать 1 нс на интервале в 1 час. [120].

Для исключения ошибок часов составляются двойные разности уравнений между измерениями приемника одновременно до двух спутников, затем разности двух соседних моментов времени. Первые позволяют исключить ошибку часов приемника, вторые – фазовую неоднозначность.

2.2.2 Эфемеридные погрешности

Погрешности в определении параметров спутника и непрогнозируемые смещения спутника относительно экстраполированной орбиты приводят к возникновению эфемеридных погрешностей. Наряду с погрешностью бортовой шкалы времени, эфемеридные погрешности могут быть представлены, как компонент эквивалентной дальномерной погрешности. Для СНС ГЛОНАСС суммарная эфемеридная погрешность, вносимая контрольно-измерительным комплексом спутника, по самым негативным оценкам не превышает 9,2 м [86,120]. Для GPS среднеквадратическое значение одной лишь эфемеридой составляющей погрешности составляет примерно 1 м [68, 120].

Для исследования мезомасштабных атмосферных флуктуаций необходимо максимально точно измерить расстояние от спутника до антенны приемника. Для этого учитывается движение спутников согласно [15, 68]. Чтобы исключить эфемеридные погрешности брались высокоточные эфемериды, полученные в результате постобработки измерений сети IGS GNSS, доступные на сайте службы ГНСС [16]. Эфемериды включают также оценки ухода часов каждого спутника. Все данные орбит и ошибок часов представлены с шагом времени 15 минут. Для расчета орбит с шагом 1 сек проводилась интерполяция методом Лагранжа (11 узлов интерполирующего полинома). Тем не менее, для устранения возможных ошибок строились двойные разности фазовых измерений.

При точном знании координат приемных антенн и эфемерид спутника из спутниковых данных можно определить погрешность, обусловленную атмосферой. Вклад ионосферной погрешности обычно исключается использованием передачи и приема сигналов GPS на двух частотах.

2.2.3 Влияние ионосферы

Рассмотрим формирование ионосферной задержки в измерениях приемников (см.(2.6) – (2.9)) и ее исключение из уравнений.

Ионосферу образуют верхние слои земной атмосферы, в которой газы частично ионизованы под влиянием ультрафиолетового и рентгеновского солнечного излучения. Ионосфера электрически нейтральна, она содержит равное количество положительных и отрицательных частиц, т. е. является плазмой [33, 87].

Рассмотрим зависимость коэффициента преломления радиоволн от высоты в ионосфере. Согласно [119] приведенный коэффициент преломления радиоволн в плазме для высоких частот определяется простым соотношением

$$N_i = -\Upsilon N_e f^2 \quad (2.10)$$

Здесь коэффициент $\Upsilon = 40,4 \text{ м}^3 \text{ с}^{-2}$, если электронная концентрация N_e выражена в м^{-3} , а частота f — в Гц. Из этого выражения следует, что N в ионосфере отрицательно, а зависимость $N_i(h)$ повторяет высотный профиль электронной концентрации $N_e(h)$. Высотный профиль электронной концентрации зависит от времени суток, сезона, широты и солнечной активности. Существенно, что приведенный коэффициент преломления плазмы убывает при увеличении частоты радиоволн.

Ионосферная погрешность измерения фазового пути приемником ГНСС (ионосферная добавка) определяется соотношением

$$I = \Upsilon \frac{\int N_e \cdot dl}{f^2}$$

Интеграл можно взять только на тех высотах, где атмосфера ионизована (от 60 до 1000 км от поверхности Земли).

Обычно рефракцию в ионосфере учитывают с помощью соотношения

$$I = -\Upsilon \cdot TEC f^{-2} \quad (2.11)$$

Где TEC — общее содержание электронов в ионосфере [14]. В более общем случае временная задержка сигнала Δt_i с частотой f в ионосфере может быть аппроксимирована, как

$$\Delta t_i = \frac{a}{f^2} + \frac{b}{f^3} + \frac{c}{f^4} = \frac{a}{f^2} \quad (2.12)$$

Экспериментально подтверждено, что вторым и третьим слагаемыми, так называемыми ионосферными эффектами высших порядков, можно пренебречь. Для рабочих частот ГНСС ГЛОНАСС и GPS их значения оцениваются соответственно, как 0.08 нс и 0.25 нс при вертикальных радиотрассах [120].

Поскольку основным объектом исследования является тропосфера, то возникает задача исключения ионосферной задержки. Основная проблема при этом состоит в том, что значение задержки очень широко меняется в зависимости от региона, в котором расположен приемник, времени суток и года, солнечной и геомагнитной активности. Значения задержки лежат в диапазоне 5 — 500 нс, среднее значение составляет 5 — 10 нс ночью и 30 — 50 нс днем для углов места, близких к 90°. С приближением к углу маски ионосферная задержка возрастает в 2 — 3 раза. Известно [74, 85], что ионосферные задержки наиболее сильны на низких широтах.

Существуют методы определения и учета ионосферной задержки на стороне потребителя:

- метод моделирования трассы;
- двухчастотные измерения;
- избыточные одночастотные измерения.

Первый метод широко применяется в одночастотных приемниках. Расчет сложной параметрической модели в стационарных условиях позволяет снизить влияние ионосферной погрешности на 60- 70%. Коэффициенты модели ионосферы обновляются раз в 10 дней, но могут обновляться чаще в периоды повышения солнечной активности [16].

Для того чтобы исключить влияние ионосферной составляющей I , в спутниковых навигационных системах используются измерения, сделанные на двух несущих частотах. Обе частоты определяются умножением одной опорной частоты

ты 10,23 МГц соответственно на 154 (частота L1) и на 120 (частота L2) [86]. Таким образом, константа отношения несущих частот $\gamma = 77/60$ известна. Это позволяет комбинировать измерения фазового пути, сделанные по первой (φ_1) и второй (φ_2) частоте так, что исключается основная часть ионосферной компоненты:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\gamma^2 - 1} \quad (2.13)$$

Двухчастотный метод позволяет свести ионосферную погрешность к десяткам сантиметров, но несколько увеличивает радиошум [119].

2.2.4 Влияние многолучевости

К погрешностям, возникающим на трассе распространения сигналов, можно отнести погрешности, возникающие по причине многолучевого распространения. В реальных условиях на вход приемника обычно поступает не только прямой сигнал со спутника, но и множество переотраженных сигналов от соседних зданий, морской и земной поверхностей. Причем, в некоторых случаях, уровень отраженного сигнала может оказаться, сопоставим с уровнем прямого.

Из-за одновременного поступления на антенну приемника нескольких переотраженных сигналов возможна их взаимная интерференция. Наиболее сложная картина многолучевого приема возникает в городских условиях в окружении высотных зданий, когда погрешность может достигать 100 м [86]. Современные приемники обычно используют технологию подавления многолучевости (см. Таблица 2.1). Тем не менее, в пунктах, в которых устанавливались антенны ГНСС, производилась оценка влияния многолучевости. По результатам этой оценки выносилось решение об установке антенны.

Измерения вариаций углов прихода дециметровых радиоволн, излучаемых спутником, показали, что флуктуации угла сильно изменяются в разные дни и сильно зависят от сезона. Летом они в несколько раз выше, чем зимой [87].

2.2.5 Оценка фазовых флуктуаций

Флуктуации параметров электромагнитных волн, распространяющихся в атмосфере, связаны с различными атмосферными процессами. В частности, с вариациями параметров приземного слоя. При теоретических исследованиях влияния атмосферы на флуктуации параметров радиоволн пользуются статистической моделью турбулентных неоднородностей атмосферы и обычно полагают, что атмосферные неоднородности изотропны. Однако приближение изотропии справедливо лишь для неоднородностей с размерами менее десятка метров [56,60, 52]. Необходимо учитывать влияние анизотропных неоднородностей больших размеров, в том числе мезомасштабных. До сих пор хорошо было изучено лишь влияние турбулентных и слоистых неоднородностей [88,89, 54, 55]. В данной работе ставится задача исследования горизонтальной мезомасштабной структуры тропосферы с помощью анализа сигналов ГНСС.

Флуктуации амплитуды, фазы, доплеровского сдвига частоты электромагнитных волн, распространяющихся в атмосфере, связаны с различными атмосферными процессами. В частности, с вариациями параметров тропосферы и ионосферы. При теоретических исследованиях влияния атмосферы на флуктуации параметров радиоволн пользуются статистической моделью турбулентных неоднородностей атмосферы и обычно полагают, что атмосферные неоднородности изотропны. В таком подходе считается, что при распространении радиоволн через нейтральную атмосферу и ионосферу наблюдаются нерегулярные вариации фазы. Радиоволны, излучаемые спутником, проходят сначала через ионосферные неоднородности, затем испытывают воздействие тропосферных неоднородностей.

Флуктуации параметров радиоволн при распространении в неоднородной атмосфере обусловлены изменением диэлектрической проницаемости. Это изменение можно разделить на систематическое, связанное с изменением средних параметров атмосферы, и нерегулярное, связанное с неоднородностями атмосферных параметров. Систематическое изменение имеет в основном высотный ход. Высотный градиент метеопараметров в атмосфере формирует высотный профиль

коэффициента преломления радиоволн и вызывает явление вертикальной рефракции. Динамические процессы в реальной атмосфере формируют неоднородную изменчивую трехмерную структуру коэффициента преломления [66, 116].

Рассмотрим общие соотношения, связывающие вариации атмосферной задержки со статистическими неоднородностями коэффициента преломления, следуя работе [119].

Фазовый путь радиоволн, прошедшей через атмосферу, может быть представлен соотношением

$$\phi = 2\pi\lambda \int_0^H dl_0 + 2\pi\lambda \int_0^H N(h, t)dl + 2\pi\lambda \int_0^H \delta N(h, t)dl \quad (2. 14)$$

Здесь первое слагаемое фаза радиоволн, распространяющихся в вакууме, она соответствует истинному расстоянию до спутника L_0 . Второе слагаемое описывает задержку в атмосфере и ионосфере без учета мелкомасштабных неоднородностей среды, оно соответствует кажущемуся увеличению дальности, т.е. $\phi = 2 \pi\lambda^{-1}\Delta L$. Третий член формулы (2. 16) отражает влияние более быстрых флуктуаций коэффициента преломления атмосферы и ионосферы δN .

Исходя из того, что время распространения сигнала менее секунды, вклад медленно меняющихся неоднородностей, включая ионосферные, можно исключить. Зная истинную дальность можно рассчитать атмосферную задержку используя корреляционные функции для описания статистических неоднородностей среды, и выражая через них флуктуации атмосферной задержки [119].

Средний квадрат флуктуаций фазы, согласно (2. 14), определяется соотношением

$$\langle \delta\phi^2 \rangle = (2\pi\lambda)^2 \langle \int_0^H \delta(N(h_1, t))dl_1 \int_0^H \delta(N(h_2, t))dl_2 \rangle \quad (2. 15)$$

Здесь $-\delta(N(h_1, t))$ разные реализации случайных флуктуаций разности коэффициента преломления в разных точках наблюдений. Перейдя к интегрирова-

нию по высоте, а также введя далее разностную координату $x = h_1 - h_2$, и переменную $y = 1/2(h_1+h_2)$, z - зенитный угол радиотрассы получим

$$\langle\langle\delta\varphi^2\rangle\rangle = \frac{(2\pi\lambda)^2\langle\delta(N)^2\rangle}{\cos^2 z} \langle\int_0^H dy \int_{-\infty}^{\infty} B(x) dx\rangle \quad (2.16)$$

Здесь $\delta\varphi^2$ -- средний квадрат флуктуаций разности коэффициента преломления, $B(x)$ -- нормированная к единице пространственная автокорреляционная функция флуктуаций $\delta\varphi$. Функция $B(x)$ четная, она уменьшается до нуля на расстояниях, много больших условных масштабов неоднородностей a_t . Вводится условный масштаб неоднородностей a_t определяемый соотношением

$$a_{i,t} = \int_0^{\infty} B(x) dx \quad (2.17)$$

Подставив в (2.16) соотношение (2.17) и проинтегрировав по областитропосферных неоднородностей, получим

$$\langle d(\varphi)^2 \rangle = \frac{8\pi^2\langle\delta(N)^2\rangle a_t \Delta H_t}{\lambda^4 \cos^2 z_0} \quad (2.18)$$

Однако приближение изотропии справедливо лишь для неоднородностей с размерами менее десятка метров [89].

На точность исследования атмосферы оказывает влияние взаимное расположение спутника относительно измерительной антенны. Следовательно, возникает задача выбора оптимального рабочего созвездия спутников, при котором обеспечивается необходимая точность измерений. Наилучшие местоположения антенн ГНСС подбирались так, чтобы влияние многолучевой отсутствовало, а также наблюдалось максимальное количество спутников.

Для оценки уровня погрешности фазовых измерений приемников ГНСС ставился специальный эксперимент. Мы оценивали фазовые измерения при горизонтальном разnose приемных антенн 12, 5 м. При таком размере базы крупные неоднородности не будут влиять на измерения.

Чтобы исключить колебания фазы за счет ошибки часов спутника формируют разность фаз сигналов от этого спутника, измеренного на двух приемниках. Чтобы исключить колебания фазы за счет ошибки часов приемника рассчитывают двойную разность, выбрав из результатов данные, полученные из одновременных наблюдений двух спутников двумя приемниками. Рассчитывались двойные разности задержек для периода наблюдений, разделенного на 10-минутные реализации. Из получившегося ряда вычитался средний тренд, обусловленный увеличением или уменьшением разности радиотрасс за счет движения спутника, таким образом, рассчитываются отклонения в фазовых измерениях. 98% выборок дифференциальных фазовых измерений имеют нормальное распределение шума (оценка проводилась по критерию Колмогорова).

На Рис 2.2 представлен пример полученного ряда для оценки дисперсии фазовых измерений. По осям отложены фазовые измерения в м и время в долях часа.

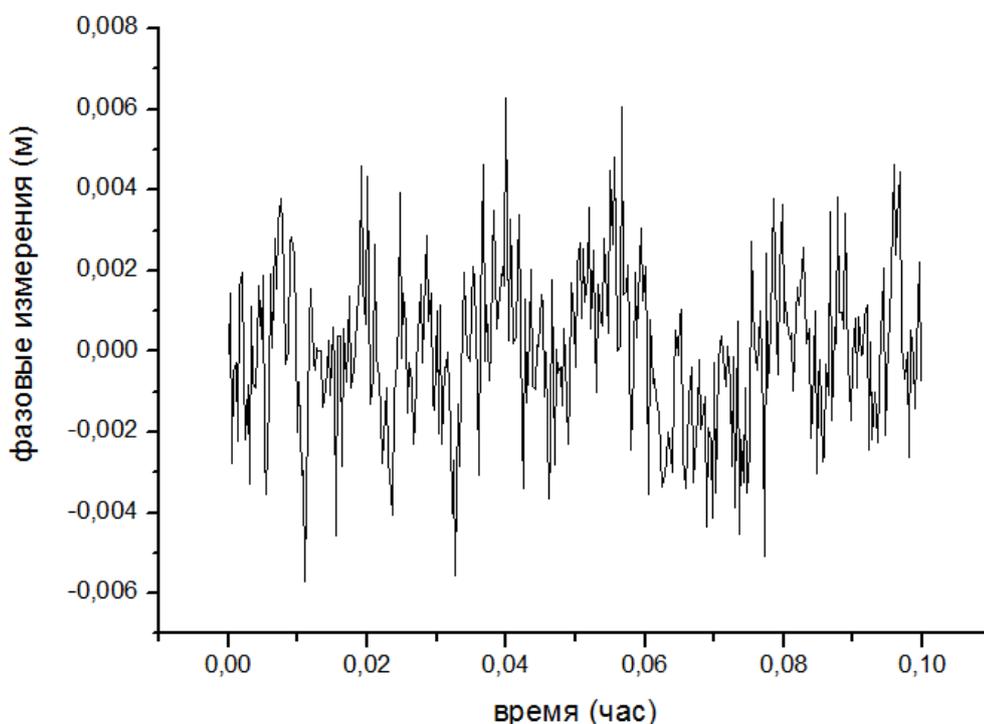


Рис2.2 Оценка дисперсии фазовых измерений.

Видно, что значения фазовых измерений испытывают малые флуктуации с течением времени. Проведя измерения по малой базе, мы определили, что точность измерения двойной разности фаз равна 0,002 м. Проведены серии недельных экспериментов, как в летний, так и в зимний период 2008 г. Значение среднеквадратического отклонения не меняются в зависимости от времени суток и сезона.

Эта оценка также показала малую изменчивость (в пределах ошибки измерения) на расстоянии до 26 м. Этот факт показывает, что метод чувствителен только к неоднородностям с масштабами в несколько сотен метров и более, т. е. к мезомасштабным неоднородностям. При исключении систематической зависимости и на базах до 40 км 98% выборок дифференциальных фазовых измерений имеют нормальное распределение шума.

2.3 Тропосферная задержка радиосигналов спутниковых навигационных систем и ее вариации

Тропосфера - приземной слой, толщиной 12-18 км, характеризующийся убыванием температуры с высотой. В нем сконцентрирована 4/5 массы атмосферы, и вся влага [82]. В первом приближении тропосферу рассматривают, как плоскослоистую среду, в которой коэффициент преломления убывает с высотой.

Рассмотрим далее влияние высотной зависимости коэффициента преломления n на изменение фазы и псевдодальности радиоволн, излучаемых спутником ГНСС.

В тропосфере n зависит от давления P , температуры T и влажности e следующим образом [116]

$$n = \frac{77,8}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) \cdot 10^{-6} + 1 \quad (2.19)$$

здесь давление и влажность выражены в миллибарах, а температура в градусах Кельвина. Для радиоволн также используют приведенный коэффициент преломления

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

Обычно считают, что в тропосфере давление и влажность в среднем убывают с высотой по экспоненциальному, а температура примерно по линейному закону [83], поэтому средний высотный профиль приведенного коэффициента преломления можно аппроксимировать экспонентой

$$N = N_0 \exp(-b_1 h) \quad (2. 20)$$

Приповерхностное значение приведенного коэффициента преломления N_0 , в соответствии с (2.19), может быть определено по измерениям P_0 , T_0 и e_0 . В средних широтах зимой N_0 в среднем равно $3,06 \times 10^{-4}$, а летом эта величина близка к $3,3 \times 10^{-4}$. Параметр b_1 в среднем равен $0,13 \text{ км}^{-1}$, он подвержен изменениям в пределах от $0,12$ до $0,14 \text{ км}^{-1}$. Величина b_1 может быть определена по значению N_0 с учетом того, что приведенный коэффициент преломления на высоте 1_0 км , где N равно $9,2 \times 10^{-4}$, отличается большим постоянством. С учетом этого обстоятельства и выражения (1. 9) имеем

$$b = -\frac{1}{10} \ln \left(\frac{9,2 \cdot 10^{-5}}{N_0} \right) \quad (2. 21)$$

Из соотношений (2. 9), (2. 20) и (2. 21) следует, что зависимость $N(h)$ может быть найдена по приземным значениям давления, температуры и влажности.

Необходимо иметь в виду, что реальный высотный профиль $N(h)$ может отличаться от экспоненциального. Эти отличия обычно оказывают влияние в задачах распространения радиоволн [52, 69, 119].

Рефракция сигналов спутника в тропосфере обусловлена неоднородностями и изменением диэлектрической проницаемости в пространстве. Значение тропосферной рефракции зависит от факторов, влияние которых хорошо изучено и

поддается прогнозу (влажность воздуха, давление, температура). С точки зрения влияния на распространение радиоволн, тропосферу рассматривают как смесь сухого воздуха и водяных паров [44]. Показатели преломления для этих компонентов точно измерены. Зная влажность воздуха, можно рассчитать значение коэффициента преломления для смеси. Для средних метеоусловий тропосферная погрешность обычно прогнозируется как

$$\Delta T \approx \frac{K_t}{\sin \xi} \cdot \int_0^{S_t} (n - 1) dS$$

Здесь K_t — параметр, характеризующий состояние тропосферы, ξ угол места радиотрассы, n — коэффициент преломления радиоволн, S_t — протяженность тропосферного участка трассы радиосигнала. Задержку фазы радиосигнала в тропосфере можно представить в виде:

$$\Delta T = \int_0^H N_t(l, t) dl$$

Здесь интеграл берется по высоте, обычно до 100 км. Тропосфера вносит вклад в эту величину около 80 %. Строго говоря, термин «тропосферная задержка» не совсем правильный. При малых углах места тропосферная рефракция (и ионосферная тоже) достигает максимума, так как радиоволны проходят при таких углах наибольший путь. Поэтому в навигационных задачах принимают во внимание только те спутники, которые находятся выше, чем так называемый угол маски величиной $5^\circ - 10^\circ$ [13].

В тропосфере происходит экспоненциальное убывание величины индекса рефракции дециметровых радиоволн с высотой. Соответственно с высотой уменьшается влияние атмосферных флуктуаций. Поэтому основной вклад во флуктуации тропосферной задержки радиоволн будет вносить приземный слой.

При вертикальных радиотрассах тропосферная задержка минимальна, ее значения 2,1 м – 2,8 м.

В работах [54, 55,92, 67, 72, 31,70] показано, что тропосфера неоднородна не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении, причем мезомасштабные атмосферные неоднородности могут существенно влиять на точность радиотехнических измерений.

Угол рефракции при больших значениях зенитных углов радиотрасс z_0 испытывает медленные вариации и быстрые флуктуации. Медленные вариации $\Delta \xi$, обусловлены изменениями высотного профиля приведенного коэффициента преломления, связанными с изменениями метеоусловий. Быстрые флуктуации углов прихода радиоволн связаны с влиянием и слоистых, и статистических неоднородностей коэффициента преломления, последние обусловлены как турбулентностью тропосферы, так и мезомасштабными неоднородностями.

В данном исследовании необходимо учитывать влияние анизотропных неоднородностей больших размеров, в том числе мезомасштабных. Тропосферная задержка радиоволн определяется из уравнений фазовых измерений (2. 8) и (2. 9).

$$\Delta T = \int_S N(h, t) dl = \int_S N_0(h, t) dl + \int_S \delta N (h, t) dl \quad (2. 22)$$

Первое слагаемое описывает зависимость от медленных макромасштабных флуктуаций. Несмотря на то, что под их воздействием основные параметры тропосферы испытывают большие, но очень медленные изменения, не попадающие в исследуемый временной интервал, мы пренебрегаем соответствующими вариациям. Второе слагаемое представляет собой быстрые вариации являющиеся суммой мезомасштабных и турбулентных неоднородностей. Так как время жизни флуктуаций тропосферы вызванных турбулентными неоднородностями непродолжительны, то при усреднении тропосферной задержки за 15 мин и больше полностью исключаем их влияние. Такое представление позволяет нам оценить вклад неоднородностей нужного нам масштаба на распространение радиоволн.

Перейдя к разности тропосферных задержек, мы получим следующее выражение

$$\Delta T(t) = \int_S \delta(N_1 - N_2) dl \quad (2.23)$$

В тропосфере происходит экспоненциальное убывание величины индекса рефракции дециметровых радиоволн высотой. Соответственно с высотой уменьшается влияние атмосферных флуктуаций. Поэтому основной вклад в флуктуации тропосферной задержки и, соответственно, в структурную функцию, будет вносить приземный слой. По оценкам работы [66] в тропосфере из-за флуктуации индекса рефракции дециметровых радиоволн для радиотрасс с зенитной длиной до 20000 км среднее отклонение может достигать 450 м.

Мы оценили вклад тропосферы в общую задержку радиосигналов по среднесезонной модели атмосферы, определенной соотношениями (2.20) и (2.21). Она равна 78%. Вклад пограничного слоя в тропосферную задержку составлял 31%.

В предыдущем разделе показано, что сигналы, получаемые приемниками спутниковых навигационных систем, содержат в себе характеристики среды, в которой они распространяются. Это позволяет нам разработать методику исследования мезомасштабной структуры тропосферы с помощью системы GPS приемников, разнесенных на расстояние несколько километров.

Ключевым параметром дистанционного зондирования тропосферы является зенитная тропосферная задержка радиосигналов спутниковых навигационных систем (ZTD), равная разности оптического и геометрического пути сигнала спутниковых навигационных систем в нейтральной атмосфере в зенитном направлении и измеряемая в единицах длины.

Ее оценивают из уравнений, которые строят по измерениям фазового пути радиосигналов от каждого спутника до каждой антенны приемной сети по формуле (2.8). Чтобы удалить ошибки из-за несинхронности хода часов формируются двойные разности измерений, сделанные одновременно на двух наземных приемниках до одних и тех же двух спутников [13].

Эти уравнения используются в дальнейшем для оценки зенитной тропосферной задержки, ионосферной задержки, их пространственных разностей. При

вычислении тропосферной задержки по измерениям одной антенны, составляются двойные разности уравнений между измерениями приемника одновременно до двух спутников, затем разности двух соседних моментов времени. Первые позволяют исключить ошибку часов приемника, вторые – фазовую неоднозначность [44]. При вычислении тропосферной задержки или ее пространственной разности по измерениям в двух пунктах для уменьшения ошибки, вызванной уходом часов приемника и спутника, составляются двойные разности уравнений фазовых измерений, полученных двумя пространственно разнесенными приемниками с двух спутников.

Для исключения ионосферного воздействия на длину фазового пути используются двухчастотные измерения, позволяющие составлять ионосферно-свободные комбинации [11]. Хотя при использовании ионосферно-свободной комбинации учитывается только ионосферный эффект первого порядка, малость величин высших порядков позволяет при решении задачи отнести их к шуму измерений ζ .

При этом наклонные тропосферные задержки сигналов T , принятых от спутников с различными углами места, представляются в виде произведения зенитной тропосферной задержки, общей для всех синхронных наблюдений с одного приемника, на некоторую картирующую функцию m , зависящую от зенитного угла спутника z [13, 42]:

$$\Delta T = ZTD \cdot m(z)$$

Эти функции оценивают вклад нейтральной атмосферы в ΔT в зависимости от зенитного угла радиотрассы z и учитывают кроме фазовой скорости радиосигнала искривление радиотрассы. Применяются картирующие функции при углах $z > 70^\circ$ [13]. Мы использовали функции Чао

$$m(z) = \frac{1}{\cos z + \frac{0.00143}{\operatorname{ctg} z + 0.00035}}$$

Эта функция имеет постоянные коэффициенты и широко применяется в различных задачах мониторинга [44].

Решением составленных уравнений для ионосферно-свободных комбинаций являются значения разности ZTD для двух пунктов, в которых расположены приемники.

Дальнейшим шагом является преобразование ZTD в интегральное влагосодержание IWV . Поскольку ZTD представляет собой сумму задержек, вызванных сухими газами и водяными парами, то она может быть представлена в виде [41]:

$$ZTD = ZHD + ZWD = A \int \frac{P}{T} dh + B \int \frac{e}{T^2} dh$$

Здесь ZHD и ZWD – задержки электромагнитных волн, которые определяются влиянием неполярных газов атмосферы (сухая задержка) и влиянием водяного пара (влажная задержка), P и T – давление и температура сухого воздуха, e – парциальное давление паров воды, A и B - константы. Интеграл берется по высоте, начиная от высоты приемной антенны. Первое слагаемое, определяется по модели Састамойнена [113], использующей в качестве входных данных приземное давление и координаты приемной антенны. Разность ZTD и ZHD дает значение влажной задержки. Интегральное влагосодержание атмосферы прямо пропорционально влажной тропосферной задержке радиоволн, коэффициент преобразования зависит от температуры, измеряемой метеостанцией на поверхности Земли [66]. Значения приземных метеопараметров определялись по базе данных [**Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.**].

2.4 Сравнение экспериментальных результатов с численным моделированием тропосферной задержки радиоволн

На основе численного моделирования метеопараметров с помощью мезомасштабной модели WRF получены трехмерные поля коэффициента преломления в атмосфере, для точки расположения антенны получена осредненная зенитная стандартная тропосферная задержка и ее динамика [67].

Полученные траектории распространения радиоволн и оптические длины трасс позволяют рассчитать наклонную тропосферную задержку для радиотрасс с различным направлением и зенитными углами. Наличие приемников GPS и ГЛОНАСС позволяет снимать характеристики радиосигнала на трассе спутник-Земля и вычислять соответствующие тропосферные задержки.

Полученный временной ряд экспериментальных значений тропосферной задержки обладает значительной изменчивостью, отсутствующий в модельных данных, обусловленных, по-видимому, значительным влиянием турбулентных и макротурбулентных явлений и ошибками измерения. Для их исключения ряд экспериментальных значений стандартной тропосферной задержки дополнительно сглаживался по 6 ч. окну.

На Рис. 2.3 приведена суточная динамика зенитной тропосферной задержки, полученная как в результате численного эксперимента, так и сглаженные результаты измерений приемником. Кодовые измерения тропосферной задержки (групповой путь радиосигнала спутник - приемник) обрабатывались следующим образом. Для каждого измерения вычислялась приведенная к зениту тропосферная задержка, полученные результаты усреднялись по синхронным измерениям, проводилось сглаживание со скользящим шестичасовым временным окном. Для восстановления суточных вариаций зенитной тропосферной задержки из фазовых измерений комбинировались двойные разности (синхронные по различным спутникам и временные приращения этих величин). Затем по полученным значениям решалась обратная задача восстановления суточных вариаций зенитной тропосферной задержки с учетом трех гармоник суточного хода.

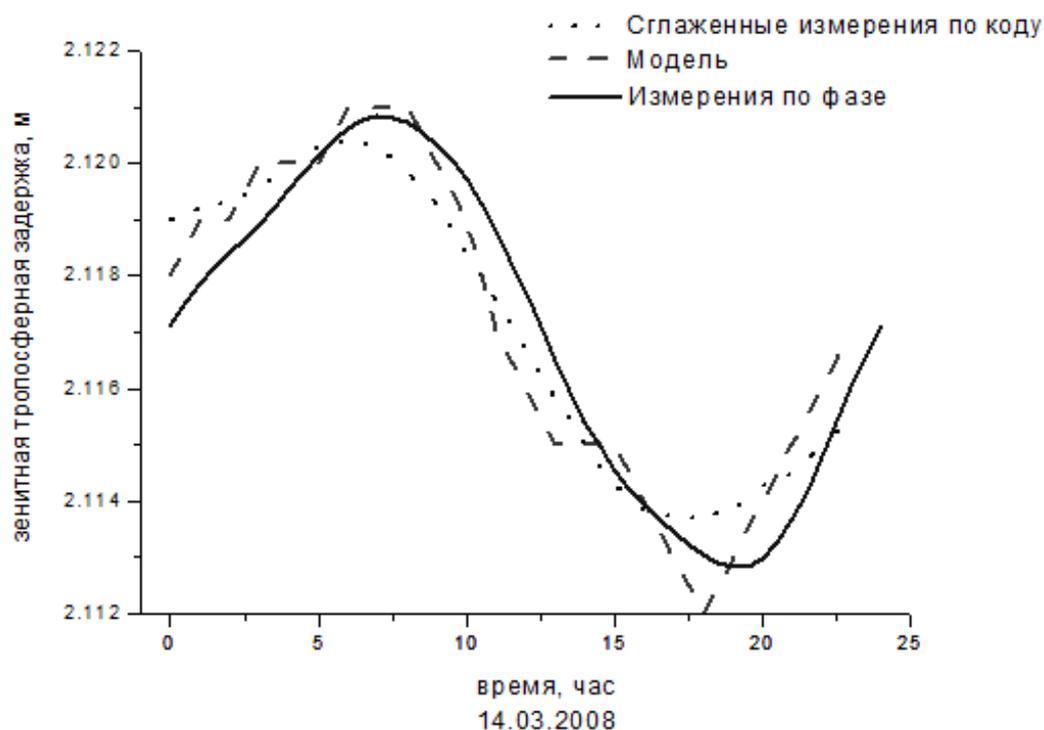


Рис.2.3 Суточная динамика зенитной тропосферной задержки 14.03.08

На основе численного моделирования неоднородного поля коэффициента преломления в атмосфере, получена осредненная зенитная стандартная тропосферная задержка и ее динамика за 14 марта 2008 г [99]. Осреднение проводилось по радиотрассам, покрывающем небесную полусферу зенитными углами 0° , 30° , 45° , 60° и направлениями на 8 основных географических направлений с шагом 45° . На полученных трассах считалась стандартная тропосферная задержка, приводилась к зенитной, усреднялась по ансамблю направлений. Полученные экспериментальные тропосферные задержки радиосигналов СНС также приводились к зенитному углу [27]. Полученная пространственная функциональная зависимость аппроксимировалась в виде степенного полинома.

На Рис 2.4 представлено сравнение горизонтальной пространственной структуры тропосферной задержки. Слева – решение обратной задачи восстановления сглаженной горизонтальной структуры зенитной тропосферной задержки

по фазовым измерениям приемника ГНСС (отклонение от среднего). Справа – данные численного эксперимента.

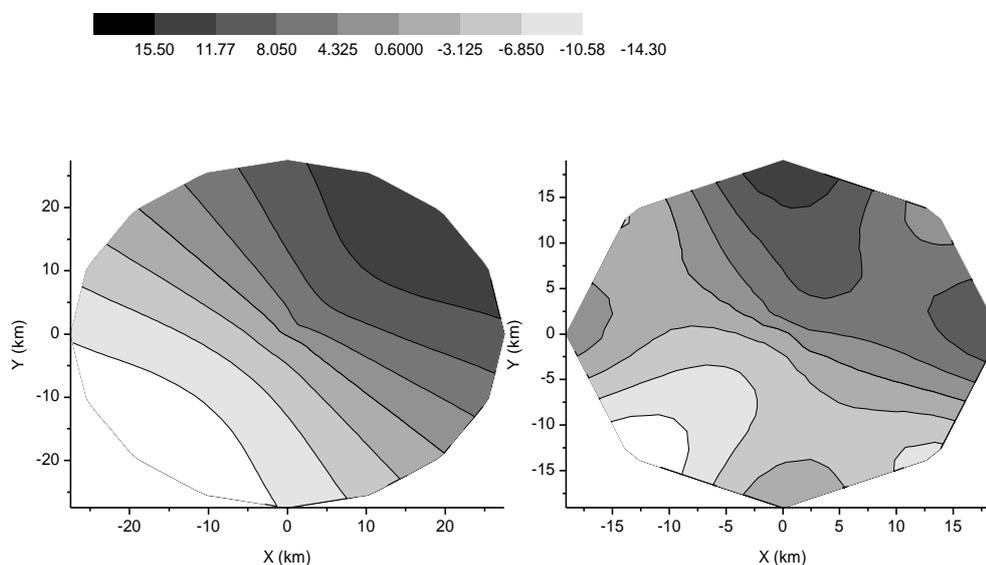


Рис. 2.4 Сравнение горизонтальной пространственной структуры тропосферной задержки радиосигнала спутниковых навигационных систем. Слева – по измерениям приемников ГЛОНАСС-GPS. Справа – результаты численного эксперимента (14. 03. 08 10:00 UTC). Цветовая шкала – отклонение от среднего уровня в мм.

Проведенное сравнение показывает хорошее соответствие модельной тропосферной задержки и сглаженных экспериментальных данных. Видно, что оба графика показывают схожие значения по величине тропосферной задержки.

Сравнение показало хорошее соответствие результатов измерений и численного эксперимента, как для временных, так и для пространственных вариаций тропосферной задержки радиосигналов ГНСС.

2.5 Выводы

В данной главе описаны принципы исследования атмосферы по радиоизмерениям сети приемников ГНСС, даны спецификации и описание использован-

ной аппаратуры. Построена сеть приемников ГНСС, разнесенных на расстояние от 1 до 35 км. Такое пространственное разрешение позволяет оценивать структуру тропосферы в области мезомасштабных процессов.

Рассмотрены основные погрешности, влияющие на расчет тропосферной задержки сигналов СНС. Показано, что дифференциальные фазовые измерения позволяют компенсировать ошибки синхронизации часов приемников и спутников. Двухчастотные измерения позволяют исключить ионосферную задержку из фазовых измерений. Правильный выбор местоположения приемников позволяет минимизировать ошибки многолучевости.

Получена оценка точности дифференциальных фазовых измерений радиосигналов ГНСС, которая равна 0,002 м при этом 98% выборок дифференциальных фазовых измерений имеют нормальное распределение шума. Описывается разработанный метод, позволяющий производить мониторинг тропосферной задержки радиоволн в области мезомасштабов.

Сравнение горизонтальной структуры тропосферной задержки радиоволн и ее суточной динамики с результатами численного моделирования показало их хорошее соответствие.

Глава 3 Структурная функция атмосферной задержки радиосигналов СНС как количественная характеристика атмосферных неоднородностей

3.1 Математический аппарат структурных функций как метод исследования атмосферных флуктуаций

В практике исследований влияния неоднородностей на распространение радиоволн наиболее широко используются два метода – спектральный и метод структурных функций [88, 89]. При измерении спектров надо учитывать, что в измеряемый сигнал входит суперпозиция влияния неоднородностей абсолютно всех размеров, а при использовании структурных функций в измеряемом сигнале не учитывается влияние неоднородностей более некоторого размера [90, 91]. Для радиотрасс спутник - наземный приемник наиболее пригоден второй метод – структурные функции. Физический смысл структурной функции есть среднее квадрата флуктуаций исследуемой величины в области соответствующих пространственных или временных масштабов в процессах со стационарным приращением [90].

$$D_q(r) = \langle (q(r + \Delta r) - q(r))^2 \rangle \quad (3.1)$$

Здесь q – оцениваемая величина, представленная в виде функции, r – аргумент этой функции, расстояние.

Структурную функцию вводят для количественной оценки атмосферных процессов [73]. Следуя работе [88] рассмотрим поля: поля скорости ветра V , и температуры (T) и индекса рефракции дециметровых радиоволн. Как известно [90], в земной атмосфере приближенно можно температуру считать как пассивную консервативную примесь.

Согласно теории развитой турбулентности в атмосфере наблюдается зависимость, описывающая закон изменения структурных пространственных функций в зависимости от размеров (масштабов) неоднородностей [88].

Различным масштабам атмосферных неоднородностей соответствует различный вид структурной функции. Рассмотрим различные процессы подробнее. Очень удобным является представление турбулентных потоков в виде совокупности вихрей с масштабами от l_0 до L_0 , получивших названия внутреннего и внешнего масштаба турбулентности соответственно.

Внутренний масштаб турбулентности l_0 был оценен А. М. Обузовым на основании формулы, предложенной А. Н. Колмогоровым [88]. Оценка дала значение внутреннего масштаба $l_0 = 2$ мм. При этом внутренний масштаб зависит от коэффициента трансформации солнечной энергии в кинетическую получившего название турбулентная вязкость.

$$\varepsilon_E = k \frac{I_0 g}{4P_0} \quad (3.2)$$

где k - доля солнечной энергии, трансформирующейся в кинетическую энергию воздушных масс, принимаемая равной 0,02, I_0 - солнечная постоянная, равная 1,38 кВт/м², g - ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с², P_0 - среднее значение давления на поверхности Земли, равное 1013 гПа. С ростом высоты вязкость возрастает [73, 88], что приводит к увеличению l_0 .

Для самых малых неоднородностей меньше, чем «внутренний» масштаб турбулентности l_0 мы имеем:

$$D_v(r) = Cr^2 (0 < r < l_0) \quad (3.3)$$

где C - структурная постоянная. В константу входит также удельная диссипация турбулентной энергии [89].

С дальнейшим ростом размеров неоднородностей мы переходим в изотропную область инерционного интервала. Количественной характеристикой не-

однородностей в этой области является "закон 2/3" для поля скорости в развитой турбулентности, предложенный А. Н. Колмогоровым, в 1941 году, согласно которому разность между скоростями в точках M_1 и M_2 , удаленных друг от друга на расстояние r , описывается статистическим законом [88]

$$D_v(r) = \overline{(V_2 - V_1)^2} = C \varepsilon_E^{2/3} r^{2/3} \quad (3.4)$$

где $D_v(r)$ - структурная функция поля скорости;

$V_{1,2}$ - скорость ветра в точках M_1 и M_2 , м/с;

C - численная константа, равная примерно 1,9;

ε_E - средняя скорость диссипации кинетической энергии в единице массы, $\text{м}^2/\text{с}^3$; r - расстояние между точками наблюдения, м.

Статистическая структура изотропной турбулентности может быть описана структурными функциями не только для поля скорости ветра, но и для полей температуры, влажности, и показателя преломления электромагнитных волн [89]

поле температуры

$$D_T(r) = \overline{(T_2 - T_1)^2} = C_T^2 r^{2/3} \quad (3.5)$$

поле влажности

$$D_e(r) = \overline{(e_2 - e_1)^2} = C_e^2 r^{2/3} \quad (3.6)$$

поле индекса рефракции дециметровых радиоволн

$$D_n(r) = \overline{(n_2 - n_1)^2} = C_n^2 r^{2/3} \quad (3.7)$$

где $D_T(r)$, $D_e(r)$, $D_n(r)$ - структурные функции поля температуры, влажности и индекса рефракции дециметровых радиоволн соответственно;

C_T - структурный коэффициент поля температуры, примерно равный 1,2;

C_e - структурный коэффициент поля влажности примерно равный структурному коэффициенту поля температуры;

r расстояние между двумя точками наблюдения, м.

Структурный "закон $2/3$ " для поля скорости был получен А.Г. Колмогоровым [73], для поля температуры и влажности – А.М. Обуховым [89].

Хотя флуктуации температуры на данных масштабах составляют сотые (и даже меньше) доли градуса, тем не менее, они приводят к флуктуациям показателя преломления n . Структурная функция n получается из материального уравнения $n=n(p, T)$, где p и T - равновесные значения давления и температуры и также подчиняется универсальному закону "2/3" полученного для поля показателя преломления электромагнитных волн – В. И. Татарским [88,89].

Величина C_n^2 лежит в пределах $10^{-15} \text{ м}^{-2/3} < C_n^2 < 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Она легко подсчитывается, если известна C_T^2 . Чаще всего предлагается следующая модель высотного профиля структурной постоянной показателя преломления тропосферы

$$C_n(h) = n_0 \cdot \left(1 - \frac{h-H_0}{H_T-H_0}\right) \quad (3.8)$$

Здесь $H_0 = 2 - 3$ км для суши, $H_0 = 5$ км для водной поверхности, $H_T = 10$ км.

Величина структурной постоянной у поверхности Земли испытывает сезонные и суточные вариации, для описания которых предлагается модель вида

$$C_{n0}(h) = C_0 \cdot \left(2 - \cos\left(\frac{\pi M}{6}\right)\right) \cdot \left(2 - \cos\left(\frac{\pi t}{12}\right)\right)$$

где M - номер месяца, t - время суток в часах,

$$C_0 = (4,5 \cdot 10^{-9} \div 4 \cdot 10^{-8}) \text{ см}^{-1/3}$$

Указанные в скобках значения C_0 отражают разброс величин структурной постоянной, приводимых различными исследователями [73, 76, 90].

С дальнейшим ростом масштаба мы попадаем в архимедову область инерционного интервала. Там вследствие устойчивой стратификации возникает архимедова осесимметрическая анизотропная турбулентность. Ее масштаб $L_a < r < L_0$, где

L_a - архимедов масштаб, начиная с которого становится заметным влияние архимедовых сил [88].

Для осредненных по всем направлениям структурным функциям имеем следующий вид:

$$D_v(r) = C_a r^{6/5} \quad (3.9)$$

$$D_t(r) = C_a r^{2/5} \quad (3.10)$$

где C_v индексом v для поля скорости, t - поля температуры.

Из экспериментальных данных известно что, с ростом пространственного интервала от 60 м до 1000м происходит быстрый рост структурных функций по степенной зависимости с показателем $5/3$ [75].

С дальнейшим ростом горизонтального расстояния до размеров γ - мезомасштаба и более структурная функция неоднородностей показателя преломления описывается следующим образом:

$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3} \quad (3.11)$$

Значения показателя степени структурной функции коэффициента преломления были получены экспериментально [119] для масштабов от 30 до 3000 км. При этом дисперсия показателя преломления определяется соотношением

$$y_n^2 = \frac{D_n(L_0)}{2} = \frac{C_n^2 L_0^{\frac{2}{3}}}{2} \quad (3.12)$$

Показатель преломления для тропосферы, а, следовательно, и его дисперсия, не зависят от длины волны для радиоволн длиной от сантиметров до метров. Величина структурной постоянной меняется с высотой над Землей и зависит от геофизических условий [91].

Несмотря на большое количество исследований атмосферных неоднородностей [84, 64,66], сведения о пространственно-временных вариациях структур-

ной постоянной показателя преломления довольно отрывочны и четкой модели связи этих вариаций с геофизическими и метеорологическими параметрами нет.

3.2 Методика исследования горизонтальных структурных функций атмосферной задержки радиосигналов ГНСС

Мы строим структурную функцию зенитных тропосферных задержек сигналов СНС и индекса рефракции дециметровых радиоволн N для дециметровых радиоволн в зависимости от горизонтального расстояния r между приемными станциями сети GPS и ГЛОНАСС.

$$D_n(r) = \langle (N(0) - N(r))^2 \rangle \quad (3.13)$$

$$D_{ztd}(t) = \langle (ZTD(0) - ZTD(r))^2 \rangle$$

Первый член в скобках соответствует опорному приемному пункту с условной координатой (0), а второй – к точке на расстоянии r от опорного пункта. Угловые скобки означают усреднение по времени по пространству. Физический смысл структурной функции есть среднее квадрата флуктуаций исследуемой величины в области соответствующих пространственных масштабов в процессах со стационарным приращением [102, 104, 106].

Для анализа получившихся горизонтальных структурных функций используется степенная аппроксимация вида $f(r) = ar^b$.

Как хорошо известно [116, 119], на радиотрассе спутник - наземный приемник в каждой точке коэффициент преломления n можно разделить на две части: некоторую среднюю величину, плавно зависящую от времени и координат и меняющуюся, вызванную атмосферными неоднородностями [42, 44]. Характерное время жизни турбулентных процессов – несколько секунд [73, 90], таким образом, усредняя измерения за 5-30 минут в процессе решения систем уравнений, мы исключаем быстрые процессы с малыми пространственными масштабами.

Чтобы исключить колебания фазы со стороны спутника, формируются разности фаз сигналов от этого спутника, измеренного на двух приемниках. Чтобы исключить колебания фазы на приемнике, рассчитывают двойную разность, выбрав из результатов данные, полученные из одновременных наблюдений двух спутников двумя приемниками. Рассчитывались двойные разности задержек для периода наблюдений, разделенного на 10-минутные реализации. Таким образом, мы формируем данные по пространственно разнесенным на горизонтальное расстояние радиотрассам, составляя уравнения из базовых уравнений измерений (см. п. 2.1). Усреднение по всем радиотрассам соответствует усреднению по пространству. Фазовые неоднозначности в уравнениях считаются неизвестными и также оцениваются в процессе решения.

Для оценки уровня погрешности вышеописанной методики ставился специальный эксперимент. При измерении структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн в двух приемных пунктах сети наземных приемников систем ГЛОНАСС-GPS брались синхронизированные по времени пары радиотрасс спутник - наземный пункт. Поэтому из-за одинакового влияния погрешностей, вносимых оборудованием спутника при синхронном приеме в двух наземных точках, мы получим структурную функцию, обусловленную неоднородностями, плюс погрешности, вносимые при измерениях двумя приемниками [107, 108, 109].

Производилась оценка дисперсии разности зенитной тропосферной задержки при горизонтальном разносе приемных антенн от 12, 5 м до 100 м [24]. При таком размере базы крупные неоднородности не будут влиять на измерения, а усреднением за час исключается влияние мелкомасштабных неоднородностей. Такой подход позволил оценить точность нашего метода.

На Рис. 3.1 представлена оценка дисперсии разности тропосферной задержки при малых наземных базах за 29. 12. 09.

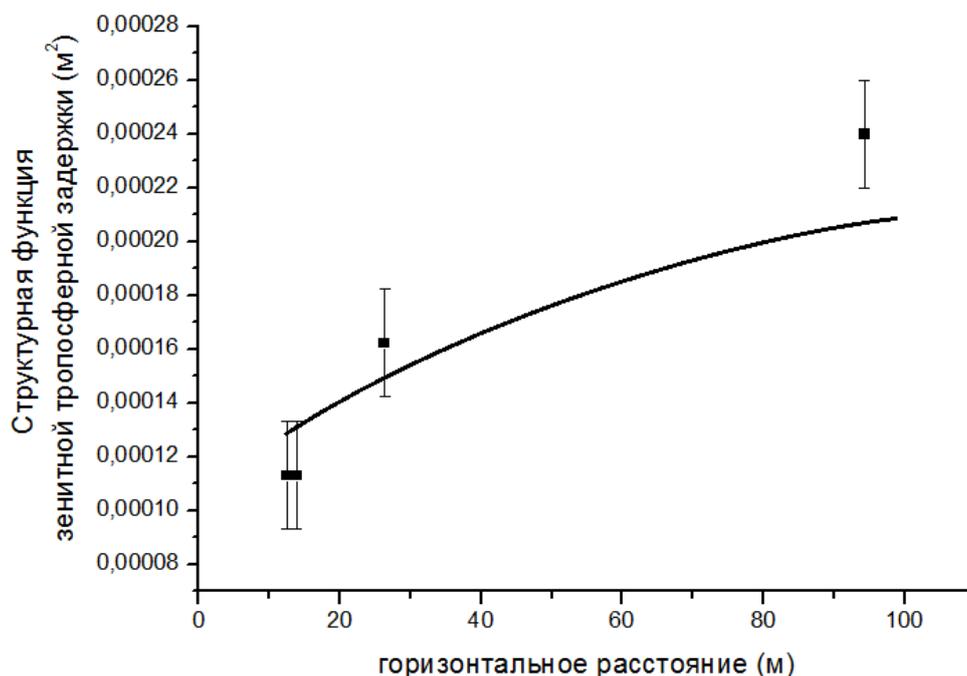


Рис. 3.1 Структурная функция зенитной тропосферной задержки за 29.12.09, доверительный показатель показывает стандартное отклонение

Видно, что значения структурной функции остаются постоянными при размерах базы до 13 метров. При размере базы в 26 метров функция показала незначительный рост. Существенный рост наблюдается только на расстоянии в 100 м. Из этого можно сделать вывод, что при оценке влияния мезомасштабных неоднородностей наша методика исследования, малочувствительна к неоднородностям менее 26 метров. Проведённые измерения дисперсии разности тропосферной задержки по малой базе показали, что точность измерения пространственной структурной функции равна $0,00012 \text{ м}^2$ [24].

3.3 Структурная функция ионосферной задержки дециметровых радиоволн

Для того чтобы оценить влияние ионосферы и тропосферы на структурные функции атмосферной задержки радиоволн в августе 2009 г. проводился эксперимент с помощью измерений двухчастотных приемников. Для оценки больших

масштабов (до 45 км) последняя точка структурной функции взята по измерениям в г. Звенигороде и в поселке Менделеево сети IGS GNSS [16]. Метеоусловия в Казани и этих пунктах в период эксперимента практически совпадали. Оценивались полученные зенитные задержки радиосигнала. Пример полученных структурных функций приведен на Рис 3.2.

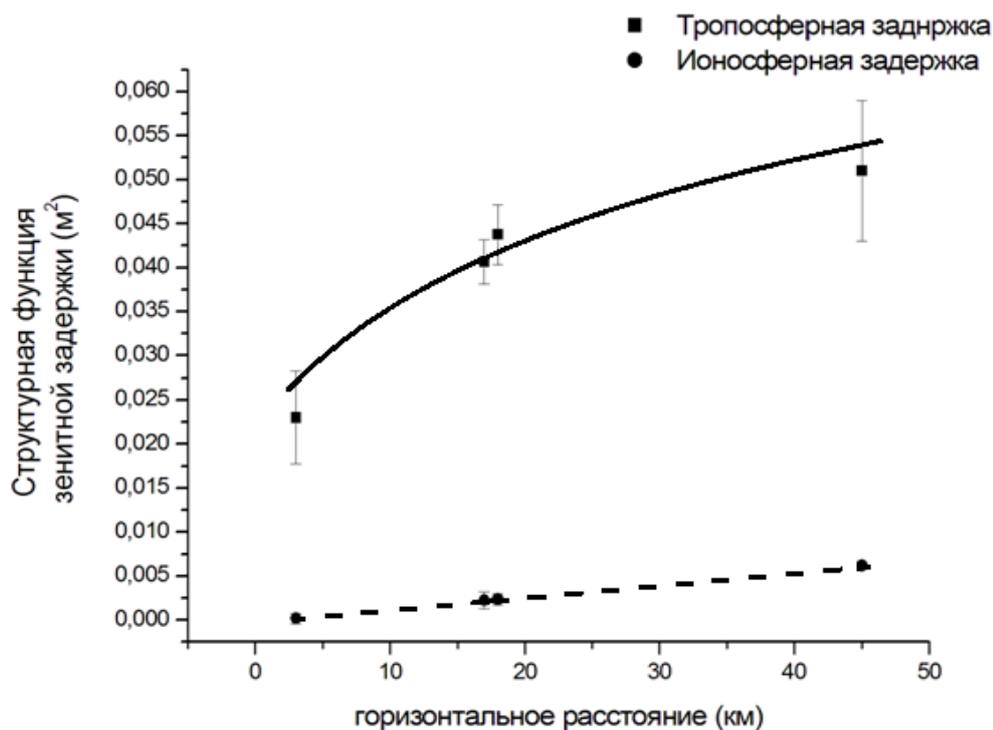


Рис 3.2 Структурные функции наклонных атмосферных задержек радиосигналов СНС для 20.08.2012, 15:00-16:00 UTC, доверительный показатель стандартного отклонения

Видно, что значения структурной функции зенитной тропосферной задержки на масштабах от 0,8 до 6 километров значительно (в 10 раз) выше, чем структурной функции ионосферной задержки радиосигналов. Данный факт показывает, что на исследуемом масштабе (до 45 км) вклад ионосферных неоднородностей в дисперсию атмосферной задержки сигналов СНС мал по сравнению с вкладом тропосферных неоднородностей.

3.4 Структурные функции тропосферной задержки дециметровых радиоволн

Для оценки влияния неоднородностей на тропосферные задержки радиосигналов СНС из многолетних данных был выбран ряд дней в августе 2009 г. (с 17 по 23 августа) [101, 104].

Для выбранного периода измерений мы строили структурные функции атмосферных задержек радиосигналов СНС с использованием измерений как двухчастотных, так и одночастотных приемников. Вычисляется структурная функция, при этом данные пар измерений для различных углов возвышения приводились к зенитному углу. Структурная функция оценивалась согласно [24, 25, 28, 100, 102, 103, 106] в интервале 0,85-35 км в течение всего выбранного периода. Исходя из представлений о виде структурной функции в исследуемом диапазоне масштабов [92, 111, 112, 115], аппроксимирующей функцией была выбрана степенная зависимость вида $f(r) = ar^b$. На Рис 3.3 представлен пример структурной функции зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009 г.

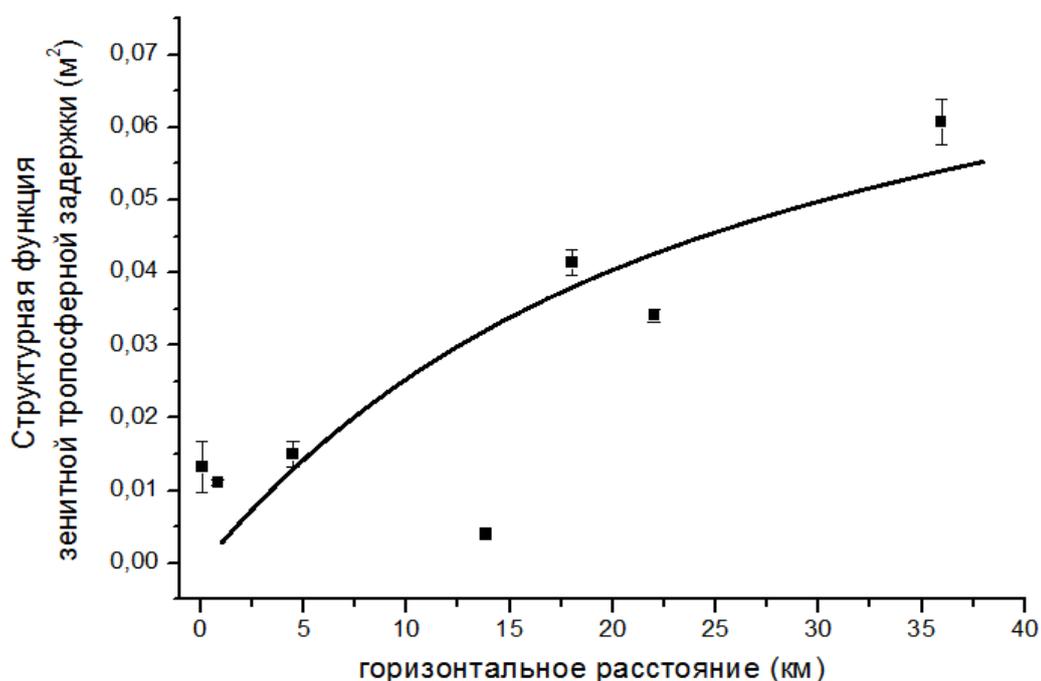


Рис. 3.3 Структурные функции зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0. 85 -35 км доверительный показывает стандартное отклонение

Видно, что начиная с 5 км, структурная функция тропосферной задержки растет с увеличением расстояния. С вероятностью не хуже 95% найдены показатели степени b . Они изменяются во времени за исследуемый период в пределах 0,6 – 0,8.

Наблюдаемый разброс в расчетных точках связан с орографическими особенностями областей, в которых расположены станции GPS-ГЛОНАСС.

Значимый рост структурной функции с расстоянием свидетельствует о том, что в этой области пространственных масштабов присутствуют атмосферные флуктуации, дающие существенный вклад в дисперсию атмосферных параметров и, соответственно, в тропосферную задержку радиосигналов СНС.

Было проведено исследование вклада неоднородностей различных временных масштабов на радиосигналы спутниковых навигационных систем. По данным ежесекундных измерений за период 01.01.2011 – 31.12.2011 были рассчитаны значения зенитной тропосферной задержки. Оценка производилась с помощью временной структурной функции рассчитанной следующим образом. Рассчитывалась структурная функция по формуле

$$D_t(r) = \langle (ZTD(t + \Delta t) - ZTD(t))^2 \rangle \quad (3.14)$$

для Δt , брались значения от 5 минут до 24 часов. Рассчитывалось среднее значение для каждого Δt .

На Рис. 3.4 представлен пример временной структурной функции за годовой период.

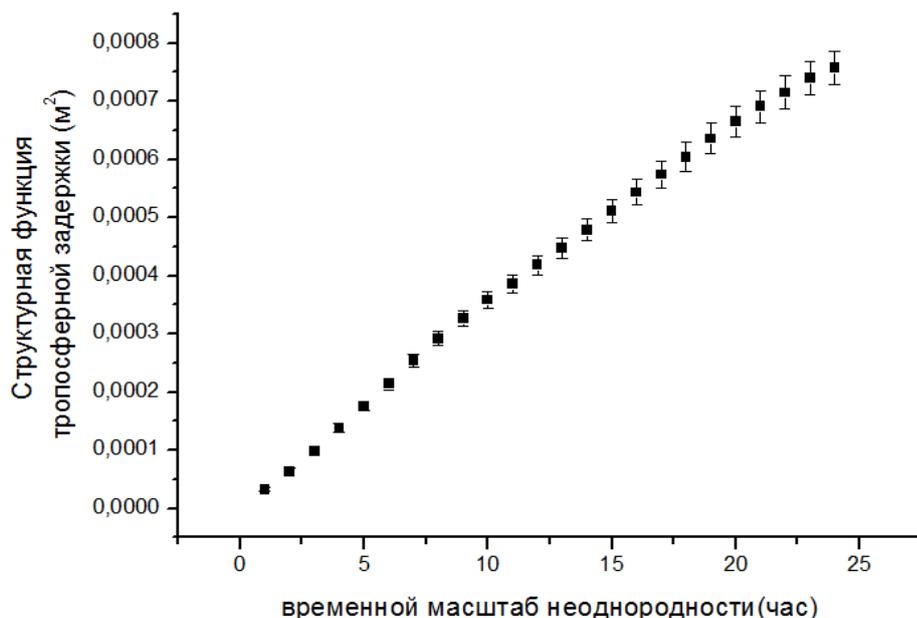


Рис. 3.4 Среднегодовые значения временной структурной функции зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности, г. Казань 2010 г.

Показано, что в среднем за год все атмосферные процессы с длительностью от 5 минут до нескольких часов дают сопоставимый вклад в дисперсию зенитной тропосферной задержки.

Для исследования мезомасштабных процессов использовались данные сети станций ГНСС в г. Казани, периода измерений 2010-2011 гг., данные сети IGS-GNSS [109] для пункта Якутск за 2011 г. и данные фотометров сети AERONET в Якутске и Томске.

В настоящее время накоплен огромный объем данных сети AERONET [16], предназначенной для определения характеристик аэрозоля по спектральным измерениям прямого и рассеянного солнечного излучения в различных пунктах Земли. Базовый инструмент сети - автоматические многоканальные фотометры Cimel. Информация подвергается унифицированному алгоритму обработки [43] для исключения облачности и обеспечения качества измерений аэрозольной оп-

тической толщ (АОТ). Вариации АОТ показывают сильную зависимость от динамики атмосферы [63].

Фотометр Cimel имеет несколько приемных каналов, предназначенных для определения спектральных оптических толщин аэрозоля в различных диапазонах длин волн. Для того чтобы исследовать мезомасштабные вариации оптических свойств атмосферного аэрозоля решено было использовать данные АОТ на длине волны 555 нм первого уровня, не прошедшие процедуры исключения облачности и корректировки по двум калибровкам. Таким образом, мы берем данные первого уровня, которые несут информацию о мезомасштабных процессах, связанных с облачностью .

Таблица 3.1 Показатель степени аппроксимации структурных функций мезомасштабных флуктуаций временных рядов АОТ, ZTD.

Временной ряд	Масштабы	Показатель степени
АОТ 555 (Якутск 2011)	2- 24 часа	0.301
АОТ 555 (Томск 2011)	2- 24 часа	0.227
ZTD (Якутск 2011)	10 мин - 24 часа	0.266
ZTD (Казань 2010-2011)	10 мин - 24 часа	0.404

Из результатов, представленных в Таблице 3.1, видно, что показатели структурных функций во всех пунктах близки к 2/3. Это говорит о схожести природы протекающих атмосферных процессов.

Спектры флуктуаций позволяют оценить вклад каждой гармоники в дисперсию флуктуаций исследуемых временных рядов атмосферной оптической толщ для излучения с длиной волны 555 нм (АОТ), зенитной тропосферной задержки (ZTD), интегрально-го влагосодержания атмосферы (IWV).

Были рассчитаны спектры временных рядов АОТ по данным за 2011 г. для пунктов Томск и Якутск. Для сравнения оптических и радиоизмерений рассчита-

ны спектры временных рядов ZTD и IWV по данным за 2011 г. для пунктов Якутск и Казань.

Показатели степени аппроксимации спектров мезомасштабных флуктуаций временных рядов AOT, ZTD, IWV приведены в Таблице 1.

Таблица 3.2 Показатель степени аппроксимации спектров мезомасштабных флуктуаций временных рядов AOT, ZTD, IWV

Временной ряд	Масштабы	Показатель степени
AOT 555 (Якутск 2011)	2- 24 часа	0.778
AOT 555 (Томск 2011)	2- 24 часа	0.729
ZTD (Якутск 2011)	10 мин - 24 часа	-0.787
IWV (Якутск 2011)	10 мин - 24 часа	-0.796
ZTD (Казань 2010-2011)	10 мин - 24 часа	-0.84
IWV (Казань 2010-2011)	10 мин - 24 часа	-0.849

Из результатов, представленных в Таблице 3.2, видно, что показатели спектральных функций во всех пунктах близки к $4/5$. Это говорит о схожести природы протекающих атмосферных процессов. Синхронные ряды AOT, ZTD и IWV в г. Якутск показывают соответствие степени аппроксимации спектра мезомасштабных флуктуаций в пределах 0.1. Это, возможно, определяется тем, что флуктуации водяного пара (IWV), плотности (ZTD) и оптической толщи определяются одними и теми же атмосферными процессами в равной степени.

3.5 Выводы

В данной главе разработана методика анализа атмосферных неоднородностей с помощью построения структурных функций тропосферных задержек дециметровых радиоволн, полученных по данным дистанционного зондирования тропосферы сигналами СНС ГЛОНАСС и GPS на сети в г. Казани.

Показано, что величина структурной функции и ее степенная аппроксимация является количественной характеристикой неоднородной структуры тропосферы. Значимый рост структурных функций в интервале горизонтальных масштабов от 800 м до 35 км говорит о том, что растет вклад мезомасштабных неоднородностей в тропосферную задержку радиосигналов дециметрового диапазона. Это свидетельствует о значительной неоднородности тропосферы в области мезомасштабов и ее влиянии на распространение радиоволн дециметрового диапазона.

Установлено, что на исследуемом масштабе неоднородностей от 0,8 до 45 км вклад ионосферной задержки в структурную функцию мал по сравнению с вкладом тропосферной.

Анализ временных структурных функций тропосферной задержки дециметровых радиоволн показал, что в среднем за год все атмосферные процессы с длительностью от 5 минут до нескольких часов дают сопоставимый вклад в дисперсию зенитной тропосферной задержки.

Показатели степенной аппроксимации спектральных функций временных рядов атмосферной оптической толщи, интегрального влагосодержания атмосферы и зенитной тропосферной задержки во всех пунктах близки к $4/5$, а структурной близки к $2/3$, что говорит о схожести природы протекающих атмосферных процессов, определяющих мезомасштабные вариации плотности, влажности и оптической толщи.

Глава 4 Проявление атмосферной динамики в структурных функциях тропосферных задержек радиосигналов ГНСС

4.1 Суточная динамика горизонтальных структурных функций тропосферной задержки радиоволн

Для оценки влияния суточной динамики мезомасштабных неоднородностей на тропосферные задержки радиосигналов СНС по многолетним экспериментальным данным сети приемников, разнесенных на расстояния от 1 до 35 км, рассчитаны горизонтальные структурные функции тропосферной задержки радиоволн в разное время суток.

Выбран летний период времени, т.к. летом усиление мезомасштабных вихрей за счет конвекции должно проявиться сильнее [82]. Подобраны периоды наблюдений, для которых отсутствуют фронты, четко проявляется суточный ход метеопараметров.

В качестве примера на Рис 4.1 - Рис 4.3 приведены графики типичных структурных функций тропосферных задержек дециметровых радиоволн, построенных по данным измерений в течение одних суток по описанной выше методике (см. Глава 3) для 23 августа 2009 г. На графиках представлены структурные функции тропосферных задержек и их доверительные интервалы, полученные в 3:00, 12:00 и 21:00 часов по местному времени [25, 26, 112, 113]. Доверительные интервалы значительно больше, чем точность измерения структурных функций и определяются временными и пространственными вариациями тропосферных задержек радиосигналов ГНСС. Как и ожидалось, структурные функции растут по мере увеличения расстояния между пунктами измерений. Т.е. вклад неоднородностей в тропосферную задержку растет с ростом размеров неоднородностей в лю-

бое время суток. Видно, что в области масштабов 1 -35 км структурная функция показывает значительную изменчивость в зависимости от времени суток

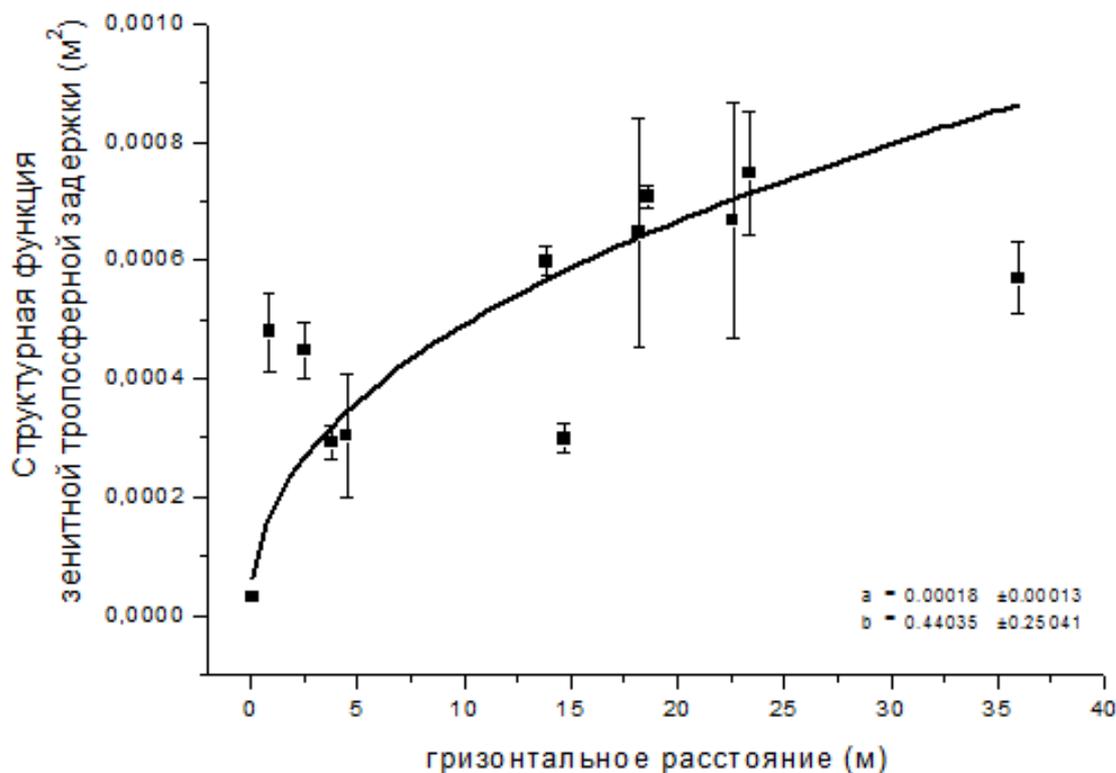


Рис. 4.1 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0,85 -35 км, для 3:00 LТи ее аппроксимация степенной функцией, км доверительный интервал показывает стандартное отклонение.

Для базы в 21-35 км в утренние часы структурная функция мало изменяется с ростом базы (см. Рис.4.1). Максимальная величина структурных функций тропосферной задержки достигает значений, равных $0,005\text{ м}^2$. Значения структурной функции были аппроксимированы степенной функцией. Для утренних измерений показатель степени равен 0,1-0,2. Это говорит о малом количестве мезомасштабных неоднородностей и их относительно слабом влиянии на радиосигналы СНС.

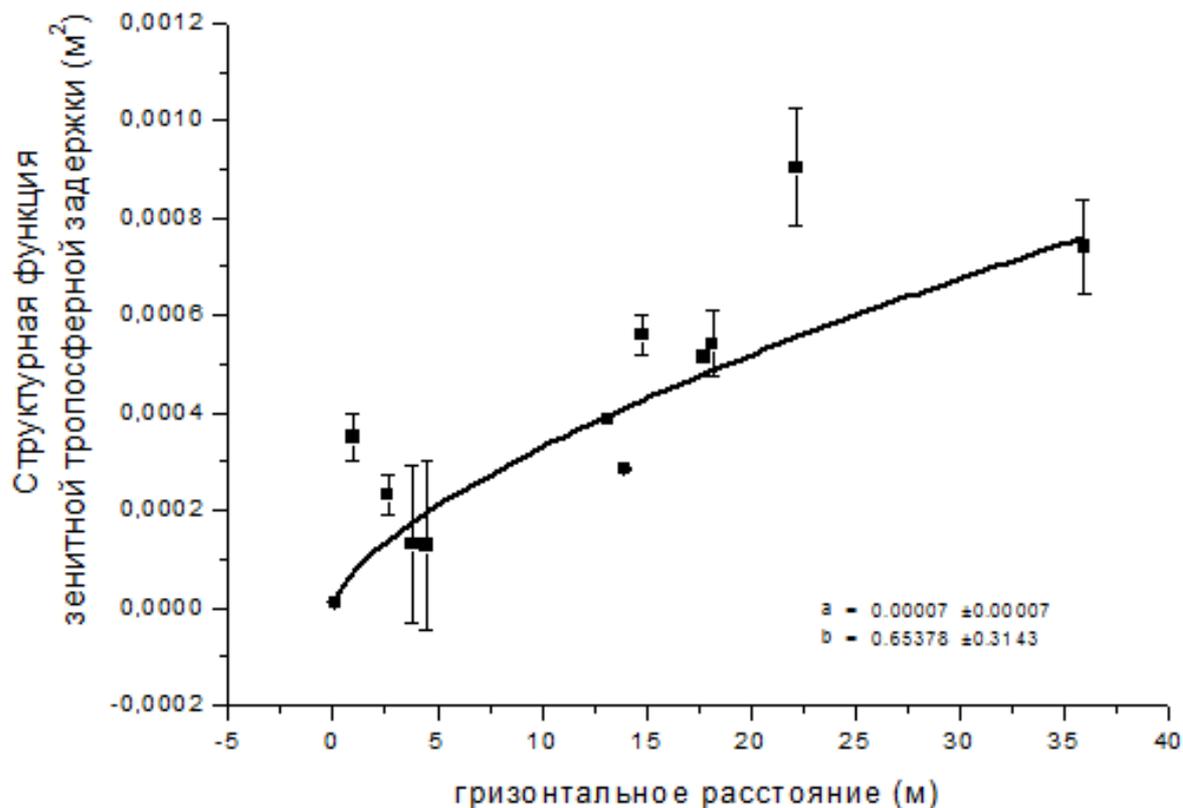


Рис. 4.2 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0. 85 -35 км, для 12:00 LTи ее аппроксимация степенной функцией кмдo-верительный интервал показывает стандартное отклонение.

Видно, что структурная функция показывает значимый рост с увеличением базы. Рост продолжается также и для базы в 21-35 км. В дневные часы величины структурных функций достигают значений 0,04-0,06 м². Значения структурных функций тропосферной задержки за дневной период были аппроксимированы степенной функцией с показателем степени 0,7.

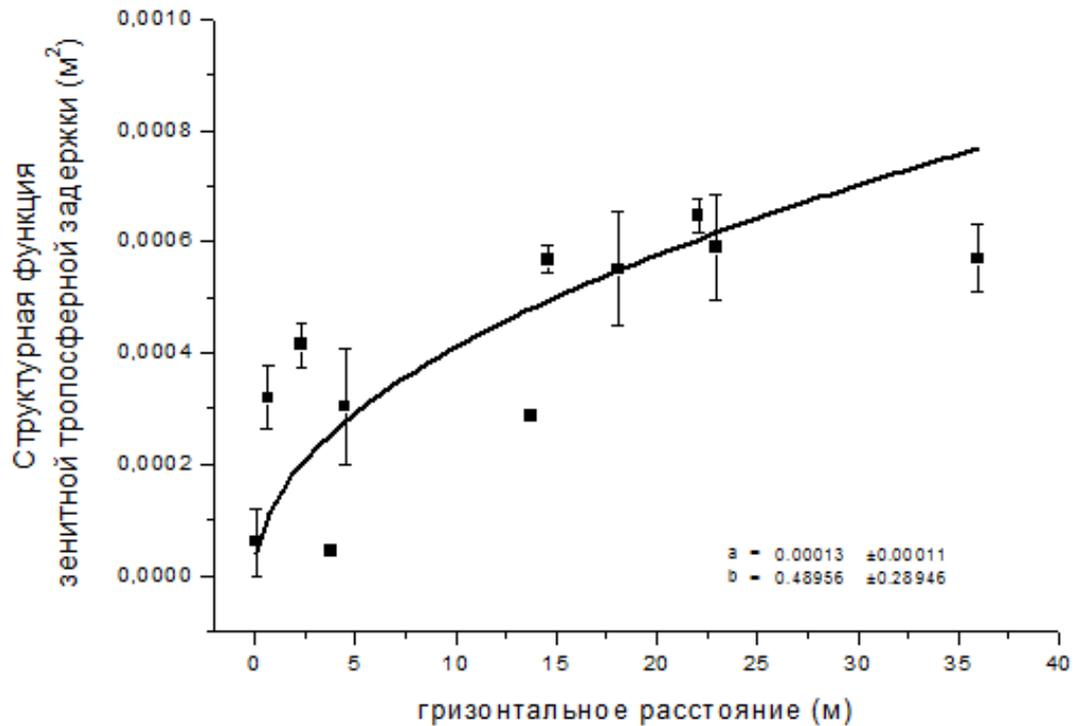


Рис. 4.3 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0,85 -35 км, для 21:00 LT и ее аппроксимация степенной функцией, доверительный интервал показывает стандартное отклонение.

Видно, что в вечерние часы для базы в 10-35 км значения структурной функции тропосферной задержки слабо меняются с увеличением базы, как и в утренние. Максимальные величины структурных функций в это время достигают значений $0,01 \text{ м}^2$. Для вечерних измерений показатель степени равен 0,1-0,2.

Вариации зенитной тропосферной задержки в течение суток представлены на Рис.4.4. Цветовая шкала - величина структурной функции в м^2 .

Видно, что максимального значения структурные функции в дневное время, в то время как минимальные значения наблюдаются в утреннее и вечернее время. Неравномерный рост структурной функции с увеличением масштаба свидетельствует о присутствии когерентных структур.

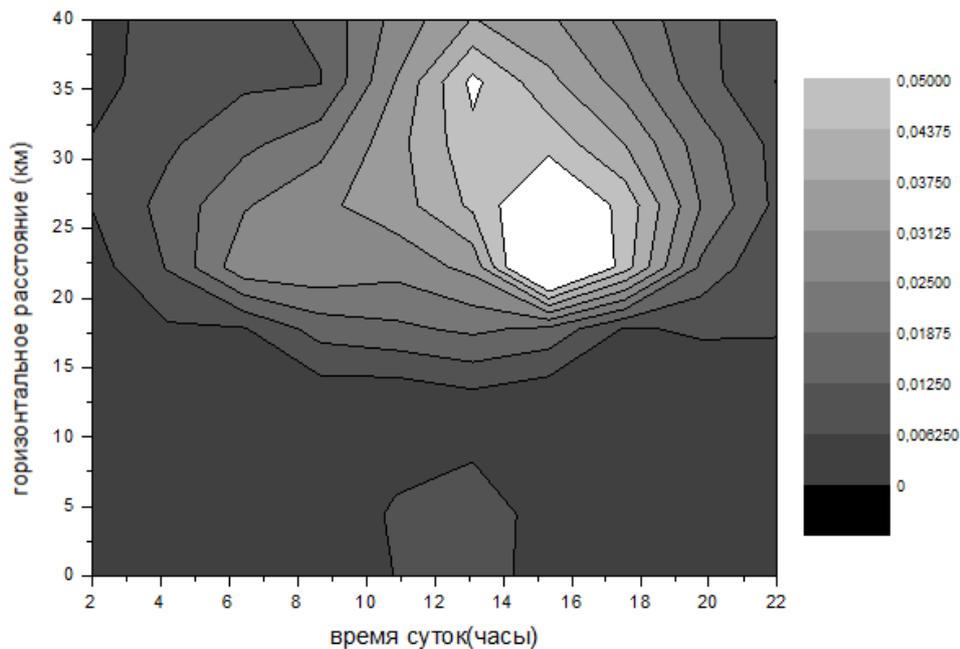


Рис.4.4 Суточная вариация структурной функции зенитных тропосферных задержек в области пространственных масштабов от 0.8 до 40 км

23 августа 2009

Такое поведение структурной функции означает, что в дневные часы увеличивается величина дисперсии индекса рефракции дециметровых радиоволн в горизонтальном направлении в области масштабов порядка десятков км. Мы предполагаем, что это связано с увеличением конвективной неустойчивости в дневные часы [62]. Анализ данных метеостанции показал, что в дневные часы средняя скорость ветра возросла до 4 м/с, в то время как в утренние и ночные она была около 1 м/с. Это косвенно подтверждает наши предположения об усилении гидродинамической неустойчивости атмосферы в дневной период и, соответственно, усилении мезомасштабных флуктуаций атмосферной плотности и тропосферной задержки радиоволн.

4.2 Сезонная динамика временных структурных функций тропосферной задержки радиоволн

В работе производилась оценка вклада тропосферных неоднородностей в задержку радиосигналов ГНСС для различных сезонов. По данным измерений радиосигналов рассчитывалась временная структурная функция для осеннего, зимнего, весеннего и летнего сезона. Для этого брались данные о тропосферной задержке за 30-31 день в различные сезоны года. Рассчитывалась структурная функция по формуле (3.15) для Δt , брались значения от 5 минут до 24 часов [29]. Рассчитывалось среднее значение для каждого Δt .

На Рис.4.5 представлены результаты оценки структурной функции зенитной тропосферной задержки, по которым можно судить о сезонной изменчивости мезомасштабных атмосферных вариаций.

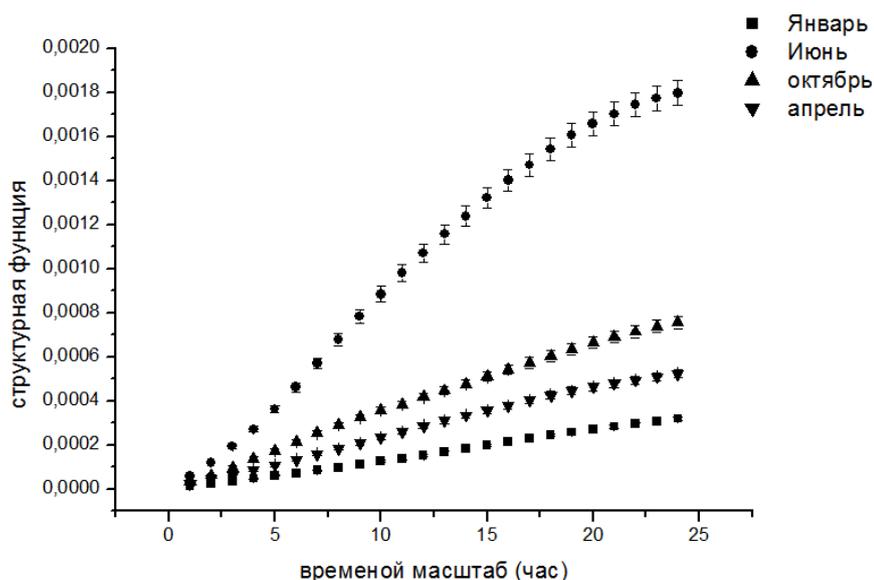


Рис.4.5 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности для различных месяцев, г. Казань.2011 г.

Для всех графиков видно, что структурная функция растет с увеличением временного масштаба, вне зависимости от месяца наблюдения.

Вариации временной структурной функции в течении трех лет представлены на Рис.4.6. Цветовая шкала - величина структурной функции в m^2

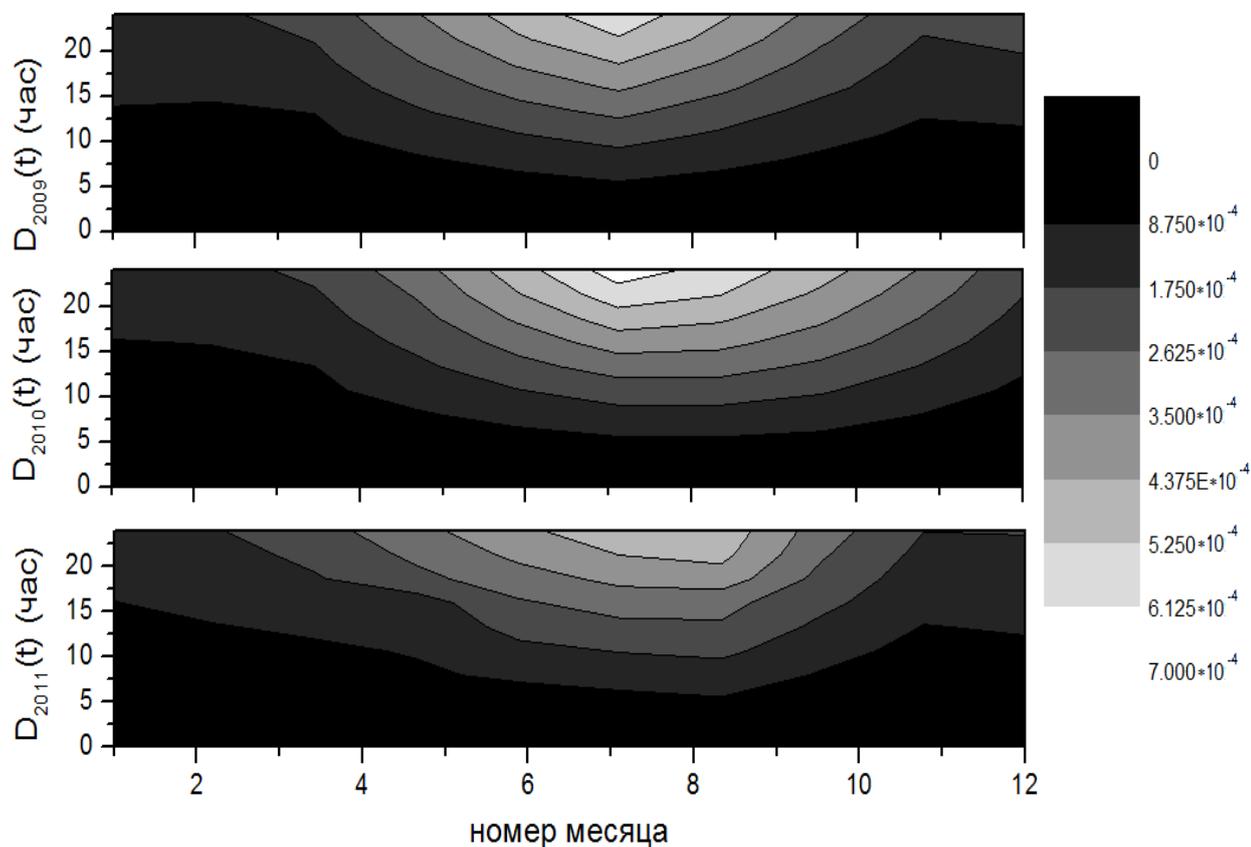


Рис.4.6Сезонный ход значений временной структурной функции зенитной тропосферной задержки в зависимости от временного масштаба 2009-2011г.

Результаты оценки показали, что наиболее высоких значений временная структурная функция тропосферной задержки радиоволн достигает в летний период ($0,0018 m^2$), минимальные значения показали в зимний период ($0,0003 m^2$).

Мы предполагаем, что такому поведению, полученных сезонных закономерностей структурной функции существует несколько причин:

- Во-первых, в летний период возрастает конвекция, вызванная нагревом поверхности Земли солнечным излучением [108]. Созданные таким образом потоки воздушных масс образуют тропосферные неод-

нородности, в том числе и мезомасштабные, тем самым усиливая вклад тропосферы в дисперсию задержки радиосигналов СНС.

- Во-вторых, в летний период увеличивается количество водяного пара в тропосфере по сравнению с другими сезонами [98]. Известно, что водяной пар в атмосфере имеет сильные пространственные вариации [79]. То есть, растет вклад неоднородностей водяного пара в вариации индекса рефракции дециметровых радиоволн также может усиливать сезонный ход флуктуаций тропосферной задержки радиоволн.

Отметим, что на графиках можно выделить три области, в которых структурная функция имеет различный вид. Для каждой из этих областей были рассчитаны степенные аппроксимирующие функции. Степень показывает вклад процессов с характерным временем жизни в тропосферную задержку. В таблице 4.1 в качестве примера представлены степени аппроксимации для различных сезонов.

По данным таблицы видно, что в зимние и осенние месяцы атмосферные процессы с различным временем жизни вносят одинаковый вклад в тропосферную задержку. В летние и весенние месяцы основной вклад вносят процессы с длительностью в несколько часов. Это может быть связано с тем, что летом и весной атмосфера более неустойчива, поэтому крупные неоднородности легко разрушаются и передают свою энергию более мелким с небольшим временем жизни.

Таблица 4.1 Степени аппроксимации временных структурных функций для различных сезонов

Масштаб процесса (час)	1-8	8-16	16-24
Январь 2010	1.002±0,013	1.125±0.016	0.948±0.016
Февраль 2010	0.937±0.014	1.057±0.013	1.212±0.006
Март 2010	1.128±0.017	1.148±0.00711	1.007±0.004
Апрель 2010	1.196±0.019	1.2±0.005	0.924±0.006
Май 2010	1.354±0.022	1.296±0.012	1.1±0.007
Июнь 2010	1.408±0.01	1.012±0.021	0.61±0.033
Июль 2010	1.427±0.016	1.323±0.009	1.078±0.009
Август 2010	1.427±0.016	1.441±0.001	1.323±0.006
Сентябрь 2010	1.363±0.012	1.384±0.003	1.32±0.006
Октябрь 2010	1.377±0.011	1.266±0.017	1.08±0.006
Ноябрь 2010	1.238±0.017	1.205±0.005	1.008±0.008
Декабрь 2010	1.166±0.024	1.324±0.008	1.224±0.003

4.3 Мезомасштабная горизонтальная структура атмосферы, восстановленная по измерениям сигналов ГНСС

Неоднородная структура тропосферной задержки определяется совокупным влиянием индекса рефракции дециметровых радиоволн в каждом высотном слое тропосферы (см. 2.22). Из-за того, что макромасштабные процессы испытывают медленные вариации, не попадающие в исследуемый временной интервал, основной вклад в дисперсию вариаций тропосферной задержки радиоволн вносится мезомасштабными процессами.

Радиоизлучение систем СНС принимается антенной приемника с разных азимутальных направлений. Используя измерения сети приемников GPS и ГЛОНАСС, можно восстановить пространственную структуру индекса рефракции дециметровых радиоволн.

Для более подробной оценки пространственной структуры индекса рефракции дециметровых радиоволн поставлена серия экспериментов с помощью сети приемников GPS-ГЛОНАСС в августе 2009 г. (с 17 по 23 августа) [23,22, 105,114].

Основная идея метода исследования мезомасштабной горизонтальной структуры заключается в том что, поле индекса рефракции дециметровых радиоволн на каждом высотном уровне можно аппроксимировать суммой линейно независимых функций от координат. Измеренные наклонные тропосферные задержки радиосигналов, полученные с разных спутников, представляют собой сумму задержек обусловленных вариациями индекса рефракции дециметровых радиоволн на каждом уровне. В результате получим систему линейных уравнений, решая которую можно восстановить структуру отклонений индекса рефракции дециметровых радиоволн от среднего профиля, характеризующую пространственное изменение метеопараметров атмосферы. Средняя вертикальная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн слабо меняется во времени, но значительно убывает с высотой согласно экспоненциальному закону. Для оценки среднего вертикального профиля коэффициента преломления радиоволн применен метод Тихонова [66]. Профиль оценивался по совокупности измерений всех семи антенн.

На Рис. 4.7-Рис. 4.12 представлена восстановленная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн за несколько часов 19.08.2009. Цветовая шкала – отклонение от среднего уровня в N-ед.

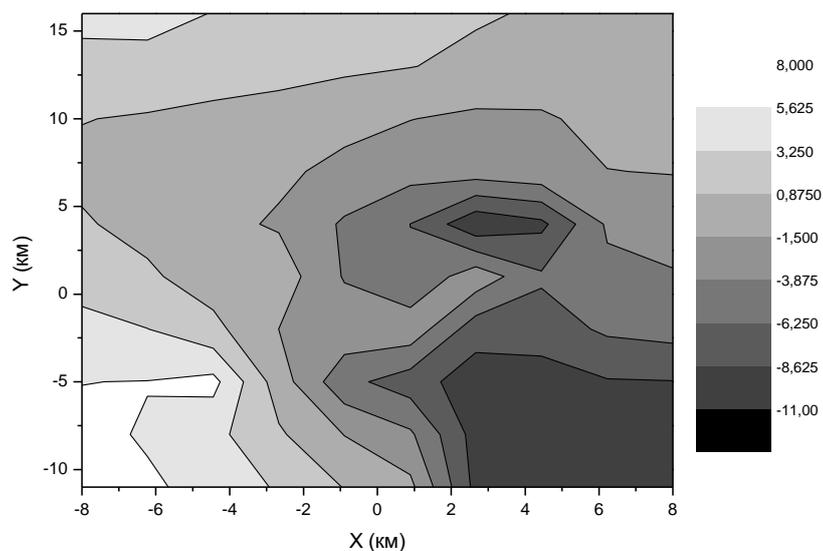


Рис. 4.7 Пространственная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн 19.08.2009 14:00-14:15 UTC

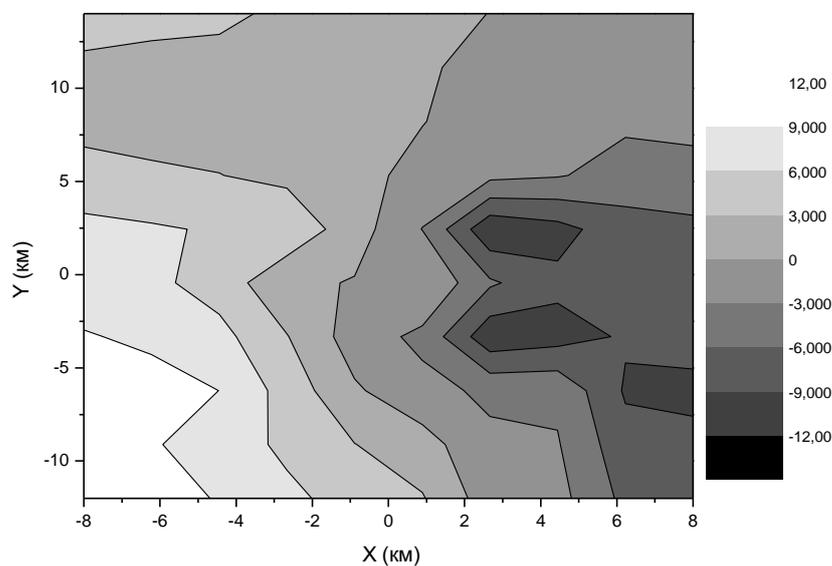


Рис. 4.8 Пространственная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн 19.08.2009 14:15-14:30 UTC

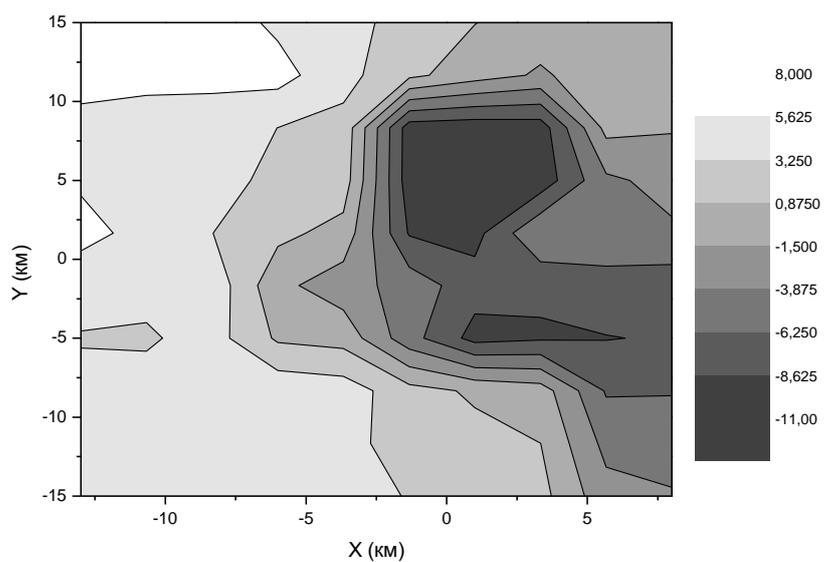


Рис. 4.9. Пространственная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн 19.08.2009 14:30-14:45 UTC

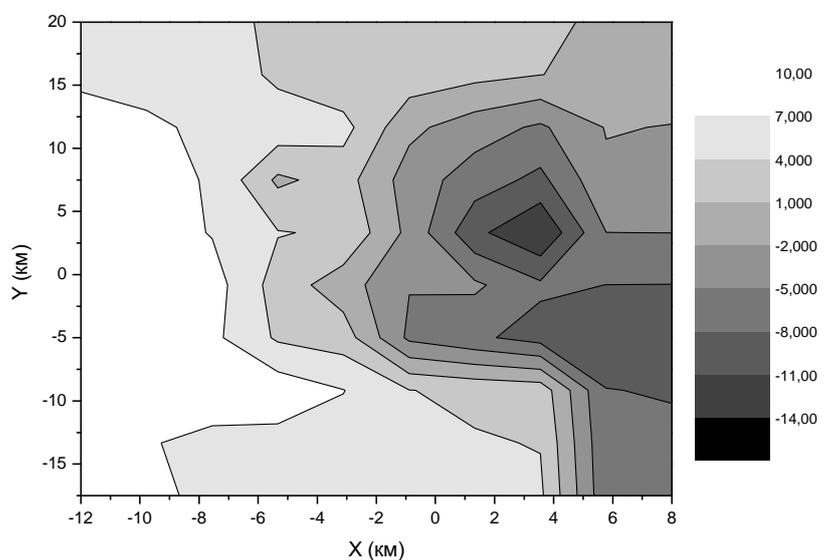


Рис. 4.10 Пространственная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн 19.08.2009 14:45-15:00 UTC

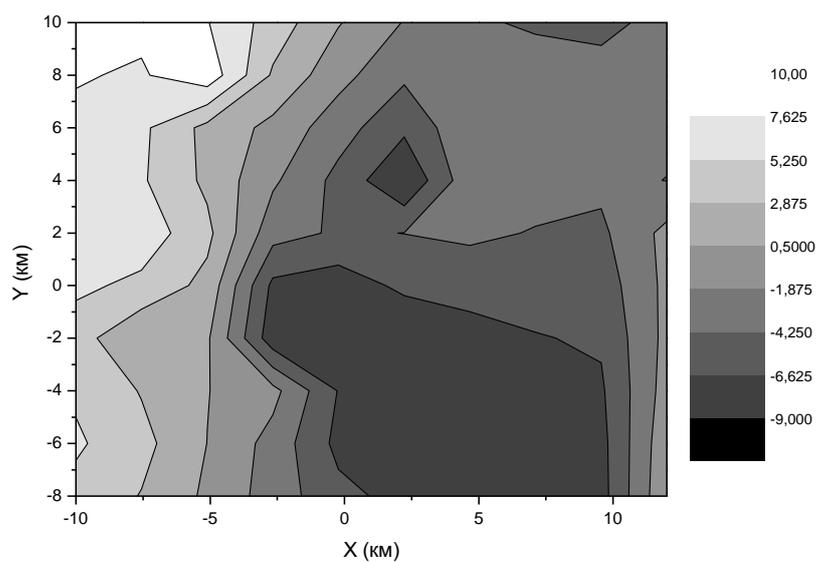


Рис. 4.11 Пространственная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн 19.08.2009 15:00-15:15 UTC

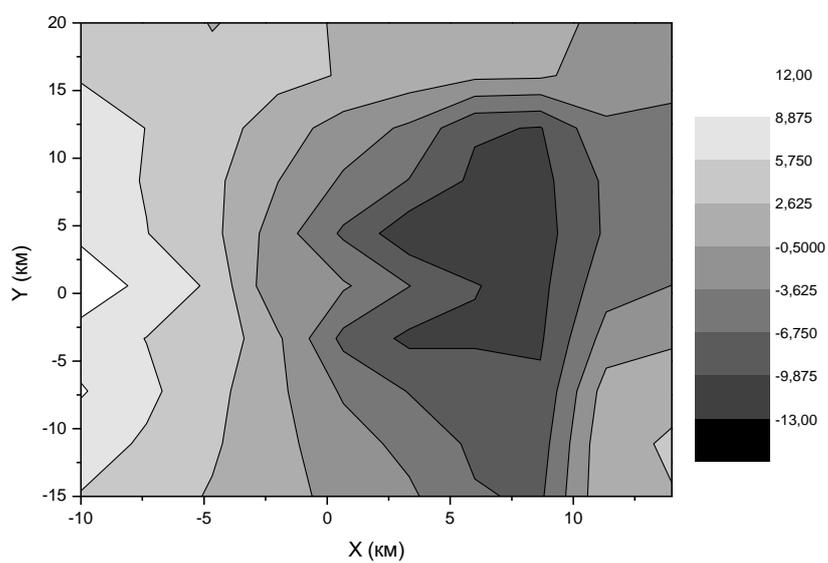


Рис. 4.12 Пространственная структура индекса рефракции дециметровых радиоволн 19.08.2009 15:15-15:30 UTC

На представленных графиках (Рис. 4.7-Рис. 4.12) видна динамика развития неоднородностей. Для указанного момента времени наблюдаются неоднородности тропосферных задержек, размерами от 2 до 7 км, что соответствует γ -мезомасштабу. Обнаружено, что для указанного момента времени наблюдаются неоднородности индекса рефракции дециметровых радиоволн, размерами от 2 до 10 км, с амплитудами возмущения в 7- 13 N-ед. Такие же характерные масштабы, с близкими амплитудами возмущения индекса рефракции дециметровых радиоволн (5-10 N-ед.) обнаружены в приземном слое атмосферы по данным сети станций атмосферного мониторинга [96].

4.4 Вертикальная динамика горизонтальной структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн

В данном разделе рассмотрим закономерности структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн, когда расстояния между пунктами приема радиосигналов несколько км.

Для того чтобы найти структурную функцию индекса рефракции дециметровых радиоволн на разных высотных уровнях сначала оцениваются тропосферные задержки радиоволн и фазовые неоднозначности из уравнений ежесекундных измерений фазового пути (2.8) и (2.9). При этом рассчитываются двойные разности фазовых путей с двух пунктов наблюдения и исключаются ионосферные задержки. Далее составляется система из интегральных уравнений (2.22) и решается относительно разности индекса рефракции дециметровых радиоволн на каждом из высотных уровней. Задача является некорректной, поэтому для решения обратной задачи использовался метод сингулярных разложений [77]. Метод верифицировался с помощью данных полученных с помощью радиозонда, отклонения не превышали 20%. Полученные коэффициенты представляют разности значения вертикального хода индекса рефракции дециметровых радиоволн в двух пунктах, по которым рассчитываются структурные функции.

Оценка производилась на поверхности Земли (на высоте антенны) и на высотах 160 м, 450 м, 800 м, 1400 м, 3 км, 5 км, 8 км и 10 км относительно поверхности Земли. На Рис. 4.13 -Рис. 4.16 представлены примеры графиков структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн и их аппроксимаций.

На

Рис 4.17и Рис 4.18 представлен пример высотного хода значений горизонтальной структурной функции.

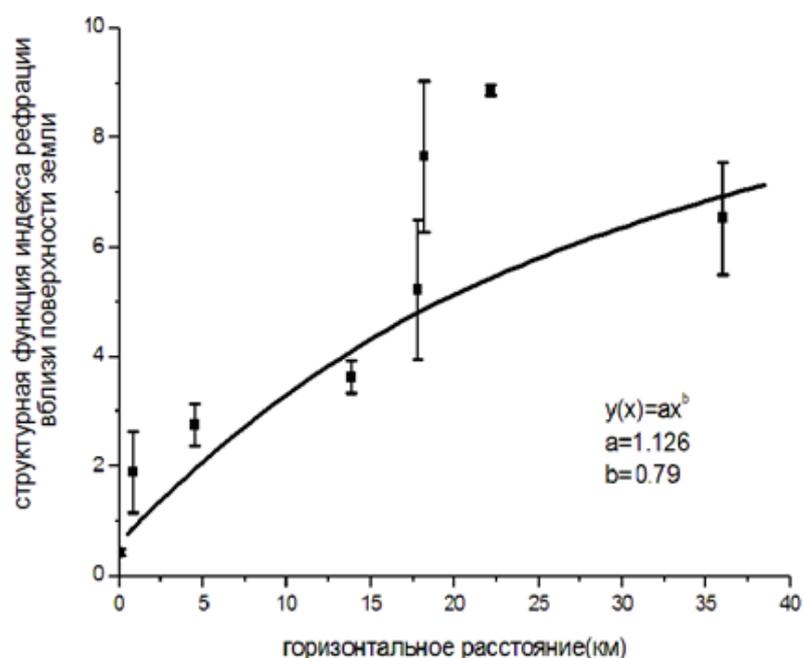


Рис. 4.13 Структурная функция индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85- 35 км вблизи поверхности Земли и ее аппроксимация степенной функцией, величина ошибки показывает стандартное отклонение.

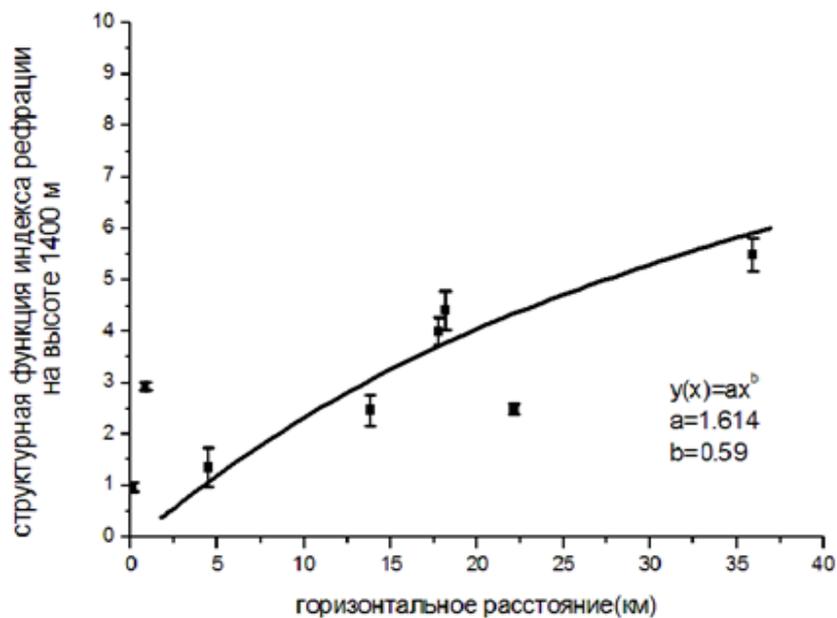


Рис. 4.14 Структурная функция индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 -35 км на высоте 1400 м и ее аппроксимация степенной функцией км величина ошибки показывает стандартное отклонение.

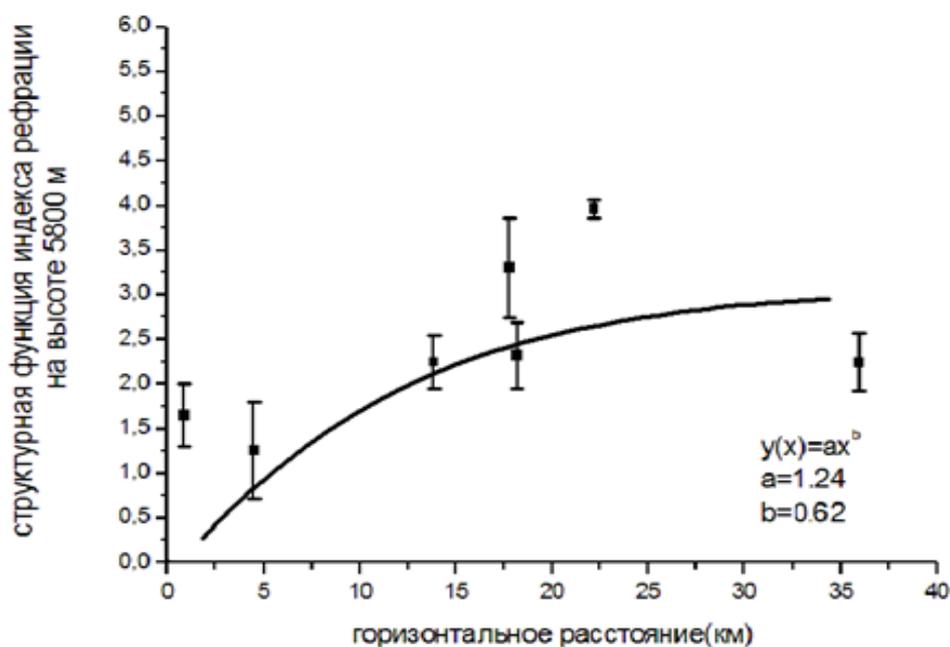


Рис. 4.15 Структурная функция индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 -35 км на высоте 5800 м ее аппроксимация степенной функцией, км величина ошибки показывает стандартное отклонение.

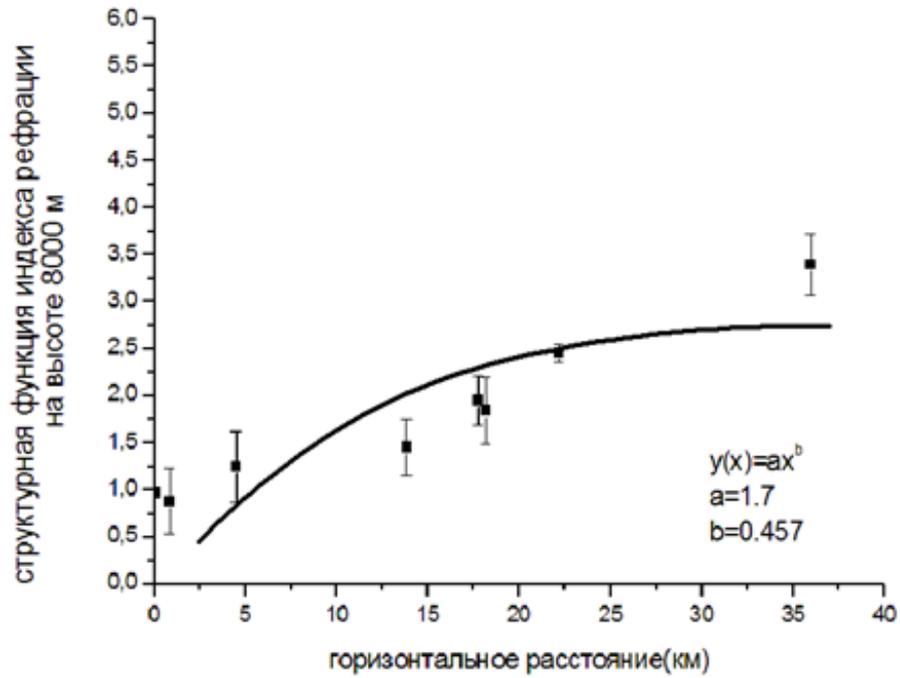


Рис. 4.16 Структурная функция индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 -35 км на высоте 8000м и ее аппроксимация степенной функцией, величина ошибки показывает стандартное отклонение.

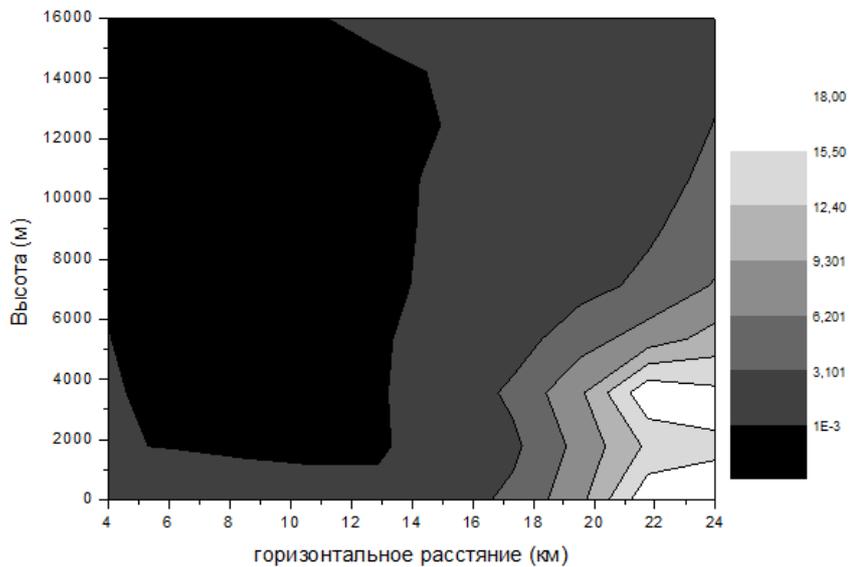


Рис 4.17 Вертикальная вариация структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 -24 км за 12.02.09. Цветовая шкала выражена в N-ед²

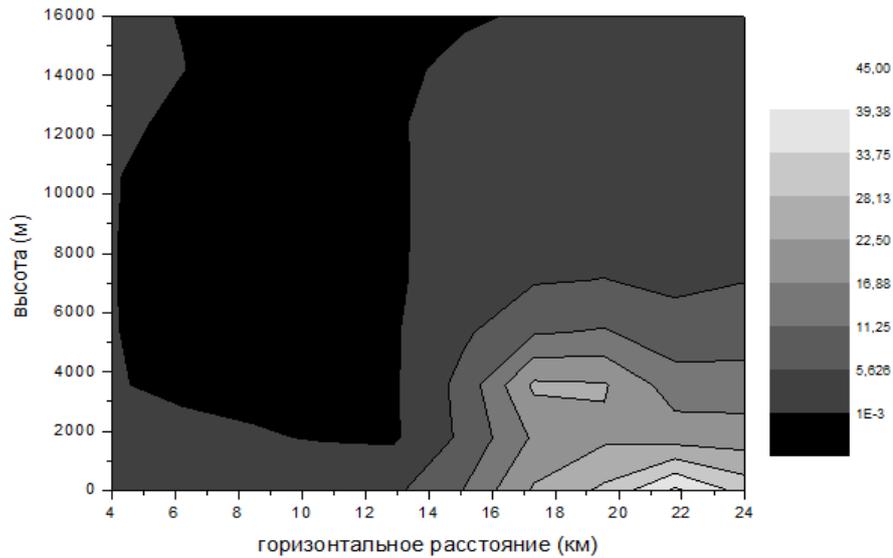


Рис 4.18 Вертикальная вариация структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 - 35 км за 17.06.09. Цветовая шкала выражена в $N\text{-ед}^2$

На основании полученных результатов можно отметить ряд общих закономерностей.

Во-первых, отмечается существенный рост горизонтальной структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн с увеличением масштаба неоднородностей, т.е. с ростом расстояния между приемными пунктами радиосигналов. Неравномерный рост структурной функции с увеличением масштаба свидетельствует и присутствии когерентных структур. Можно заключить, что вклад неоднородностей в дисперсию индекса рефракции дециметровых радиоволн растет с ростом размеров неоднородностей на всех высотных уровнях [82,90,110].

Во-вторых, значения структурных функций были аппроксимированы степенными функциями с показателем степени 0,69 – 0,82 и структурной постоянной 1,2 – 1,7. Самая большая по величине структурная функция индекса рефракции со структурной постоянной 1,72 и показателем степени 0,82 получена для приземного слоя [19,20,22].

Результаты эксперимента соответствуют работам [66,72], где с помощью численного моделирования получены трехмерные поля индекса рефракции дециметровых радиоволн. Вблизи земной поверхности, как утверждается в [66], должны наблюдаться сильные возмущения индекса рефракции дециметровых радиоволн с размерами отдельных неоднородностей от единиц до нескольких десятков километров. Зоной наибольших возмущений поля коэффициента преломления является приземная область высотой до 200 м [66].

Статистика мезомасштабных флуктуаций индекса рефракции дециметровых радиоволн была получена в [72] по данным в разных пунктах, разнесенных на расстояния от 7 до 44 км, в летние месяцы. Отклонение величины индекса рефракции дециметровых радиоволн от среднего по горизонтали доходят до 8N-ед. Максимальные мгновенные отклонения достигали значений до 29N-ед., что также соответствует нашим результатам.

Мы провели сравнение полученных результатов с независимыми оценками структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн в приземном слое. Используются данные наземной сети станций атмосферного мониторинга с ежеминутными измерениями метеопараметров в приземном слое атмосферы. Станции пространственно разнесены на расстояния от 0,9 до 30 км друг относительно друга. Измерения сети станций, расположенных в городской черте, охватывают широкий спектр атмосферных параметров. Так, структурные функции пространственной изменчивости температуры и концентрации водяного пара показали высокую степень независимости от преимущественного направления ветра [95]. В пределах доверительных интервалов структурные функции совпадают для любых преимущественных направлений ветра.

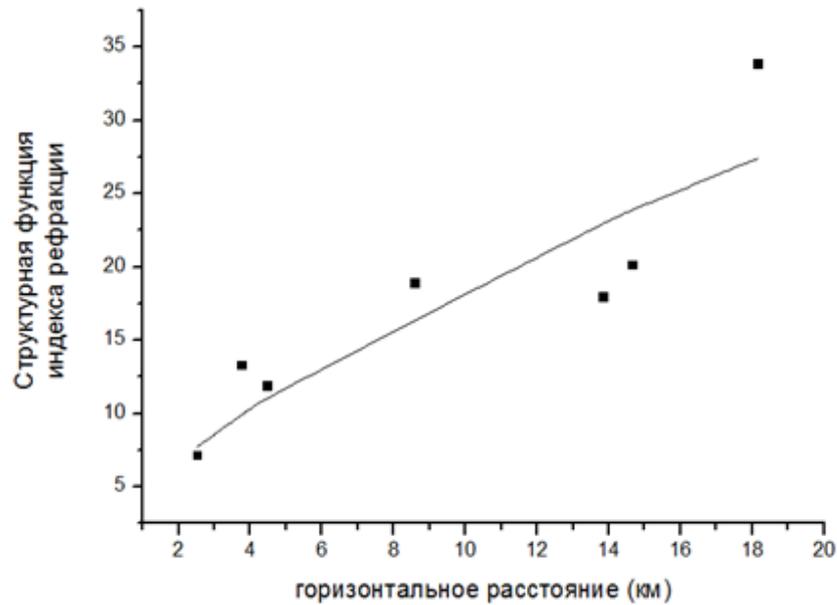


Рис.4.19 Структурная функция коэффициента преломления радиосигналов СНС и ее степенная аппроксимация для 19.08.2009 16:00-17:00 UTC

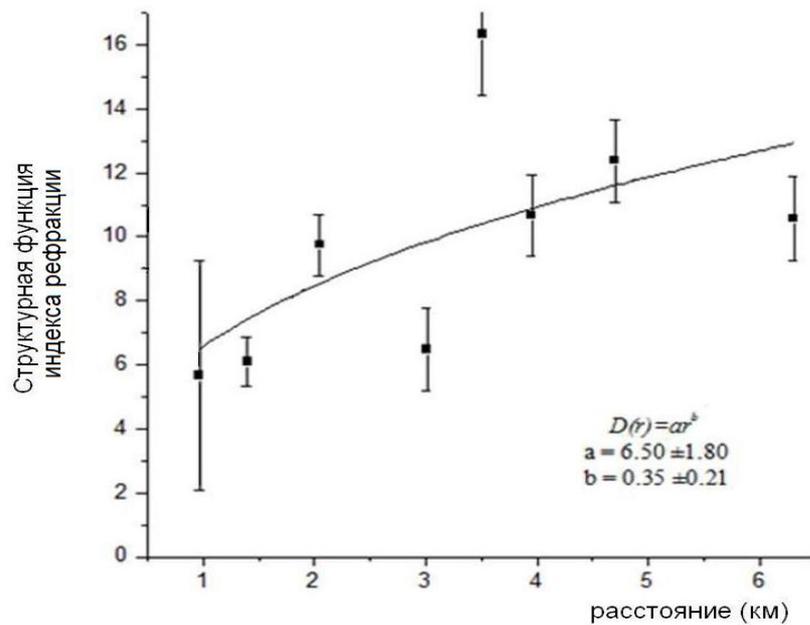


Рис 4.20 Структурная функция индекса рефракции дециметровых радиоволн электромагнитных волн дециметрового диапазона для приземного слоя и ее степенная аппроксимация.

Сравнивая данные наших измерений по сети приемников СНС и по сети станций атмосферного мониторинга, делаем следующие выводы.

В интервале масштабов размеров неоднородностей 1-6 км сравнение структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн в нижнем слое атмосферы по измерениям сети приемных станций СНС и многолетних метеоизмерений показывают хорошее согласие по величине структурных функций и по показателю степени аппроксимации [102], которые варьируются в пределах 0,6 – 0,8 для сети СНС и 0,5– 0,8 для сети станций атмосферного мониторинга.

.Оценка по аэрологическим данным подтверждает наличие высокой изменчивости атмосферных параметров в приземном слое и уменьшение этой изменчивости с ростом высоты [23].

4.5 Выводы

Оценка временных вариаций тропосферной задержки позволила обнаружить, что структурная функция тропосферной задержки дециметровых радиоволн испытывает значительную изменчивость в зависимости от времени суток. Величина структурных функций тропосферной задержки достигает максимальных значений в дневные часы. Показатель аппроксимирующей степенной функции в дневное время максимален и равен 0,7. Для утренних и вечерних измерений показатель степени равен 0,1-0,2.

Такое поведение структурной функции означает, что в дневные часы увеличивается величина дисперсии индекса рефракции дециметровых радиоволн в горизонтальном направлении в области масштабов от 1 до 35 километров. Максимальные значения структурной функции наблюдаются одновременно с максимальным значением скорости ветра в приземном слое в течение суток.

Оценка сезонных вариаций показала, что наиболее высоких значений временная структурная функция тропосферной задержки в $0,0018 \text{ м}^2$ достигает в лет-

ний период. Минимальные значения структурной функции в $0,0003 \text{ м}^2$ получены в зимний период.

Показано, что отмечается существенный рост горизонтальной структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн с увеличением масштаба неоднородностей.

Вклад неоднородностей в дисперсию индекса рефракции дециметровых радиоволн растет с ростом размеров неоднородностей на всех высотных уровнях. Наибольшие значения достигнуты структурной функцией со структурной постоянной 1,72 и степенью 0,82 получены для приземного слоя тропосферы.

В интервале масштабов размеров неоднородностей 1-6 км сравнение структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн в приземном слое атмосферы по измерениям сети приемных станций СНС и многолетних метеонаблюдений, показывают хорошее согласие по величине структурных функций и по показателю степени аппроксимации, которые варьируются в пределах 0,6 – 0,8 для сети СНС и 0,5– 0,8 для сети станций атмосферного мониторинга соответственно.

Заключение

1. Проведен многолетний эксперимент по сбору и анализу синхронных ежедневных измерений радиосигналов наземной сетью приемников ГЛОНАСС и GPS в течение 2008-2012 гг.
 2. Разработана методика измерения структурных функций тропосферных задержек дециметровых радиоволн с помощью дистанционного зондирования тропосферы сигналами ГЛОНАСС и GPS с использованием синхронных данных.
 3. Показано, что величина структурной функции и ее степенная аппроксимация являются количественными характеристиками неоднородной структуры тропосферы.
 4. Проанализированы основные погрешности, влияющие на расчет тропосферной задержки сигналов ГНСС, такие как погрешности вносимые приемником, частотно-временного обеспечения, эфемеридные, влияния многолучевости.
 5. Получены оценки точности дифференциальных фазовых измерений радиосигналов ГНСС.
 6. Показано, что на исследуемом масштабе неоднородностей от 0.8 до 40 км вклад ионосферной задержки в структурную функцию мал по сравнению с вкладом тропосферной.
 7. Оценка временных вариаций подтвердила, что структурная функция тропосферной задержки дециметровых радиоволн испытывает значительную изменчивость в зависимости от времени суток. Величина структурных функций достигает в дневные часы значений $0,06 \text{ м}^2$, что в несколько раз превышает значения для ночных часов.
 8. Трехлетние исследования временной структурной функции тропосферной задержки радиоволн показали, что существуют не только значительные сезонные, но и межгодовые вариации.
- Все закономерности получены по многолетнему циклу измерений за 2008-2012 г.

Полученные в работе результаты позволяют развить методы мониторинга атмосферы в таких направлениях как влияние городской среды на тропосферные флуктуаций индекса рефракции в масштабах от 1 до 40 км, корреляция тропосферной задержки с основными метеопараметрами атмосферы.

Список обозначений и сокращений

ГНСС - глобальные навигационные спутниковые системы

СНС - спутниковые навигационные системы

ГЛОНАСС - Глобальная Навигационная Спутниковая Система,

GPS – Global Positioning System,

UTC – Universal Time, Coordinated – Всеобщее скоординированное
время

e - давление водяных паров в воздухе (мб)

N – индекс рефракции радиоволн

n – коэффициент преломления радиоволн

t – время

T – температура (К)

θ – угол возвышения радиотрассы

z – зенитный угол радиотрассы

c - скорость света

P – групповые пути радиосигналов от спутника до приемника, измеренные по времени распространения

φ – фазовые измерения (фазовые пути радиосигналов от спутника до приемника, оцененные по фазе принятого сигнала)

I – ионосферная задержка радиоволн,

ΔT – наклонная тропосферная задержка радиосигнала ГНСС,

λ – длина волны

ZTD – зенитная тропосферная задержка дециметровых радиоволн

AOT – аэрозольная оптическая толщина

Словарь терминов

Эфемериды – таблица небесных координат спутника, вычисленных через равные промежутки времени.

Атмосферная задержка-кажущееся удлинение пути радиосигнала вызванного атмосферой. В работе атмосферная задержка представлена как сумма тропосферной или ионосферной задержки.

Зенитная тропосферная задержка-задержка, пересчитанная в зенитном направлении физически отображает то время, ГЛОНАСС - Глобальная Навигационная Спутниковая Система, российская спутниковая система навигации.

GPS– GlobalPositioningSystem, глобальная система позиционирования США.

База-горизонтальное расстояние между пунктами наблюдения.

Структурная функция-среднее квадрата флуктуаций исследуемой величины в области соответствующих пространственных или временных масштабов в процессах со стационарным приращением.

АОТ-аэрозольная оптическая толща безразмерная величина, характеризующая ослабление излучения в среде за счет поглощения и рассеяния.

Список иллюстративного материала

Таблица 1.1.1 Классификация атмосферных неоднородностей по масштабам.

Таблица 2.1 Технические характеристики аппаратуры используемой в исследованиях

Рис. 2.1 Расположение сети приемных станций ГНСС GPS – ГЛОНАСС в г. Казань, цифрами обозначены расстояния между станциями в км.

Рис. 2.2 Оценка дисперсии фазовых измерений.

Рис. 2.3 Суточная динамика зенитной тропосферной задержки 14.03.08

Рис. 2.4 Сравнение горизонтальной пространственной структуры тропосферной задержки радиосигнала спутниковых навигационных систем. Слева – по измерениям приемников ГЛОНАСС-GPS. Справа – результаты численного эксперимента (14. 03. 08 10:00 UTC). Цветовая шкала – отклонение от среднего уровня в мм.

Рис. 3.1 Структурная функция зенитной тропосферной задержки за 29.12.09, доверительный показывает стандартное отклонение

Рис. 3.2 Структурные функции наклонных атмосферных задержек радиосигналов СНС для 20.08.2012, 15:00-16:00 UTC, доверительный показывает стандартное отклонение

Рис. 3.3 Структурные функции зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009 г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 -35 км доверительный показывает стандартное отклонение

Рис. 3.4 Среднегодовые значения временной структурной функции зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности, г. Казань 2010 г.

Таблица 3.1 Показатель степени аппроксимации структурных функций мезомасштабных флуктуаций временных рядов AOT, ZTD.

Таблица 3.2 Показатель степени аппроксимации спектров мезомасштабных флуктуаций временных рядов AOT, ZTD, IWV

Рис. 4.1 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0,85 -35 км, для 3:00 LT и ее аппроксимация степенной функцией, км доверительный интервал показывает стандартное отклонение.

Рис. 4.2 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 -35 км, для 12:00 LT и ее аппроксимация степенной функцией, км доверительный интервал показывает стандартное отклонение.

Рис. 4.3 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0,85 -35 км, для 21:00 LT и ее аппроксимация степенной функцией, доверительный интервал показывает стандартное отклонение.

Рис.4.4 Суточная вариация структурной функции зенитных тропосферных задержек в области пространственных масштабов от 0.8 до 40 км.

Таблица 4.1 Степени аппроксимации временных структурных функций для различных сезонов.

Литература

1. **Basili, P.** Experimental campaign for the assessment of atmospheric water vapour retrieval by means of a GPS network [Text] / P. Basili, S. Bonafoni, R. Fe1ra [et al]// IEEE. Proc. Microw. Antennas Propag. – 2000. - V. 147. - No. 1. - P. 3078-3080.
2. **Bastin, S.** On the use of GPS tomography to investigate water vapour variability during a Mistral/sea breeze event in southeastern France [Text] / S. Bastin, C. Champollion, O. Bock, [et al]/ Geophys. Res. Lett. - 2005. – V. 32. - L05 808. - doi:10. 1029/2004GL021907.
3. **Bender, M.** Preconditions to ground based GPS water vapour tomography [Text] / M. Bender, A. Raabe // Ann. Geophys. - 2007. - V. 25. - P. 1727–1734.
4. **Bevis, M.** GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System [Text] / M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring [et al]. // J. Geophys. Res. - 1992. - V. 97, N D14. -P. 15787-15801.
5. **Boniface, K.** Impact of high-resolution data assimilation of GPS zenith delay on Mediterranean heavy rainfall forecasting [Text] / K. Boniface, V. Ducrocq, G. Jaubert [at al.] // Ann. Geophys. - 2009. - V. 27, - P. 2739–2753
6. **Davies, O. T.** Application of GPS phase delay measurements in radio science and atmospheric studies[Text] / O. T. Davies, C. N. Mitchell, P. S. J [at al.] //IEEE Proc. Microw. Antennas Propag. – 2004. - V. 151. - N 1. - P. 1-6.
7. **Davies, O. T.** Retrieval of the horizontal and vertical refractivity fields using GPS [Text] / O. T Davies, C. N. Mitchell, P. S. J. Spencer' at al. // Proc. of 11th International Conference on Antennas and Propagation. – 2001. - No. 480. - P. 288-292.
8. **Faccani, C.** Impact of a high density GPS network on the operational forecast [Text] / C. Faccani, C. Ferretti, R. Pacione [at al.] // Advances in Geosciences. - 2005. - V. 2. - P. 73–79.

9. **Flores, A.** 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays [Text] / A. Flores, G. Ruffini, A. Rius // Ann. Geophys. – 2000. - V. 18. No. 2. – P. 223–234.
10. **Flores, A.** Sensing atmospheric structure: Tropospheric tomographic results of the small-scale GPS campaign at the Onsala Space Observatory [Text] / A. Flores, L. P. Gradinarsky, P. Elrosegui, [et al.]// Earth Planets Space. –2000. - V. 52. No. 11. – P. 941–945.
11. **Guochang, X.** : GPS. Theory, Algorithms and Applications, 2nd ed., [Text] / Berlin, Springer, 2007 – 340 p.
12. **Ho, S.P.** Improvement of the temperature and moisture retrievals in the lower troposphere using AIRS and GPS radio occultation measurements [Text] / Ho S. P., Kuo Y. H. and Sokolovskiy S. V. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. - 2007. -V. 24, N 10. - P.1726–1739.
13. **Hofmann-Wellenhof, B.** Global Positioning System. Theory and Practice [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins New York: Springer. - 2001. – 356 p.
14. **Hoque, M. M.** Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning [Text] / M. M. Hoque, N. Jakowski // J. Geod. – 2007. – Vol. 81, № 4. – P. 259 – 268.
15. INTERFACE SPECIFICATION – GPS – 200. Revision D [Text] // El Segundo: 2004.-193 c.
16. International GNSS Service: <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>
17. **Jarlemark, P. O.** Remote Sensing and Characterizations of Temporal and Spatial Variations in the Wet Refractivity and the Wet Delay [Text] / P. O. Jarlemark, G. Elgered, J. M. Johansson // IEEE Proc. Microw. Antennas Propag. – 1999. - P. 2129- 2131.
18. **Kiladis, G.N.** Horizontal and vertical structure of observed tropospheric equatorial Rossby waves / K.N. Kialdis, M. Wheeler // J. Geophys. Res. - 1995. - V. 100, Issue D11. -P. 22981-22897.

19. **Khutorov, V. E.** About possibility for investigation of horizontal structural functions in troposphere for radio waves refractivity index by use of ground set of GPS-GLONASS receivers [Text] /V. E. Khutorov, A. A. Juravlev, G. M. Teptin//Radiophysics and Quantum Electronics.-2012.-T. 54, № 01.-P. 1-8.
20. **Khutorov, V. E.** Horizontal Structural Functions in Troposphere for Radio Waves Refractivity Index by Use of Ground Set of GPS-GLONASS Receivers [Text] /V. E. Khutorov., A. A. Juravlev, and G. M. Teptin// PIRS Proceedings.- 2012.- P. 944 – 947.
21. **Khutorov, V. E.** Variability of GPS-derived Zenith Tropospheric Delay and Some Result of Its Assimilation into Numeric Atmosphere Model [Text] /O. G. Khutorova, G. M. Teptin, V. E. Khutorov [et al.]// PIRS Proceedings.- 2012.- P. 940 – 943.
22. **Khutorov, V. E.** Study of mesoscale irregularities of the refraction coefficient of radiowaves in the troposphere by the methods of numerical simulation/G. M. Teptin., O. G. Khutorova, D. P. Zinin [et al.] // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010.- T. 53. № 1. -C. 1-12.
23. **Khutorov, V. E.** Sensing of the structure of the radio wave refractivity in the troposphere by a network of satellite navigation system receivers in the city of Kazan [Text] / G. M. Teptin, A. A. Vassilyev, V. E. Khutorov //Radiophysics and Quantum Electronics. -2011. C. 1-7.
24. **Khutorov, V. E.** About Minimal value of structural function for tropospheric radio waves delay [Text] // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.-2011. -V.17, N2. -P 24 -27.
25. **Khutorov, V. E.** Estimation of macroturbulence influence on the radio waves propagation in the troposphere and ionosphere using GPS-GLONASS [Text] // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2008.-V.14, N2,-P. 20 -23.
26. **Khutorov, V. E.** Some result of investigations of local by the net of seven GPS-GLONASS receivers [Text] / V. E. Khutorov, G. M. Teptin, A. M. Maksimov, [et al.]// Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2008. -V.14, N1. -P 17 -22

27. **Khutorov, V.E** Study of mesoscale irregularities of the refraction coefficient of radiowaves in the troposphere by the methods of numerical simulation [Text] /G. M. Teptin, D. P. Zinin, V. E. Khutorov // Radiophysics and Quantum Electronics. - 2010. -T. 53. № 1. C. 1-12.
28. **Khutorov, V.E.** Investigations of space temporal structure for atmospheric inhomogenities over Tatarstan/ V.E. Khutorov, G.M. Teptin, A.M. Maksimov, A.A. Vasiliyev [at al.] // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2007, V.13, N3, P 20 - 24.
29. **Khutorov, V.E.** Seasonal variation of temporary structure function air defense tropospheric delay of GPS signals / V.E. Khutorov, I.A. Nepogodin // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2013.-V., No.1-2.- P .
30. **Khoutorova, O. G.** Real-time lower- tropospheric data system based on global position system stations [Text] / O. G. Khoutorova, A. A. Vasilyev, A. G. Maksimov // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. - 2007. - V. 13, №1. - P 15-19.
31. **Khoutorova, O. G.** The altitude seasonal variations of atmospheric parameters at heights 0-5000 m [Text] / O. G. Khoutorova, A. P. Shlychkov // Environmental radioecology and applied ecology. -2004.-Vol. 10. № 1. -P. 18-21.
32. **Khutorova, O. G.** Waves in air impurities and their influence on atmospheric optical properties [Text] / O. G. Khoutorova, D. N. Douryagin, A. A. Vasilyev, G. E. Korchagin // Atmospheric Environment. - 2001. - V. 35. - P. 5131-5134.
33. **Klobuchar, J. A.** Comparative range delay and variability of the earth's troposphere and the ionosphere [Text] / J. A. Klobuchar, J. M. Kunches // GPS Solutions. – 2003. – V. 7. – No. 1. - P. 55-58.
34. **Lawrence, R. S.** On the distribution of turbulent fluctuations of refractive index in the atmosphere [Text] / Lawrence R. S. //URSI commission F. Comptesrendus proceedings. -1977. -P. 415.
35. **Liu, Y.** Mesoscale data assimilation and prediction with commercial aircraft (TAMDAR) observations/Y.Liu , M. Anderson, S. Swerdlin, L. Carson, M. Ge, W. Yu and T. Warner //BACIMO-.2005 Oct. 10 -12. Monterey, CA.

36. **Nilsson, T.** Water Vapor Tomography Using GPS Phase Observations: Simulation Results [Text] / T. Nilsson, L. Gradinarsky // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2006. - V. 44. – No. 10. – P. 2927- 2941.
37. OEMV Family Installation and Operation User Manual Rev 13 [Text] // Calgary: 2006.-182c.
38. **Paul, R.** The National Geodetic Survey Standard GPS Format SP3, NGS NOAA, 2006, [Electronic resource] .-//http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/data/format/sp3_docu.txt
39. **Pavelyev, A. G.** Radio holographic methods for atmospheric, ionospheric and stratospheric waves [Text]/ A. G. Pavelyev, J. Wickert, T. Schmidt, [et al.] // Geo Forschungszentrum (GFZ), Potsdam, -2004. Scientific Technical Report STRO4/18. - 94 p.
40. **Randolph, H. Ware** Real-time national GPS networks [Text]/ Randolph H. Ware, David W. Fulker, [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics - 2001. – 63-P. 1315–1330
41. **Rocken, C.** Water Vapor Tomography with Low Cost GPS Receiver [Electronic resource] / C. Rocken, J. Braun, C. Meerten et al. - <http://ateneophysicslabs.wordpress.com/2011/07/27/water-vapor-tomography-with-low-cost-gps-receivers/>
42. **Rocken, C.** Improved mapping of tropospheric delays [Text] / C. Rocken, S. Sokolovskiy, J. Johnson, D. Hunt // J. Atmos. Oceanic Technol. - 2001. – Jul. 01. - P. 1205–1213.
43. **Smirnov, A.** Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. [Text]/ B.N. Holben, T.F. Eck [et al.] Rem. Sens. Environ. -2000.
44. **Schuler, T.** On ground-based GPS tropospheric delay estimation [Text] // Ph. D. Thesis. – University of Munchen, -2001. – 364 p.
45. **Strong C.** Tropospheric Rossby Wave Breaking and the NAO/NAM/C. [Text] / Strong, Magnúsdóttir // Journal of the atmospheric sciences. -2007.-Feb. 7. V.65.- P. 2862-2876.

46. SUPERSTAR II User Manual Rev 6 [Text] // Calgary: 2005.-62с.
47. **Troller, M.** Tomographic determination of the spatial distribution of water vapor using GPS observations [Text] / M. Troller, A. Geiger, E. Brockmann et al. // Advances in Space Research. – 2006. - V. 37. – Iss. 12. – P. 2211–2217.
48. **Valeo, C.** Estimating snow evaporation with GPS derived precipitable water vapour [Text] / C. Valeo, S. H. Skone, C. L. I. Ho, S. K. M. Poon, S. M. Shrestha // Journal of Hydrology. - 2005. – V. 307. – Iss. 1-4. – P. 196-203.
49. **Vennebusch M.** Temporal and spatial stochastic behaviour of high-frequency slant tropospheric delays from simulations and real GPS data/ Markus Vennebusch, Steffen Schon, Ulrich Weinbach // Advances in Space Research - 2011. -V.47. –P.1681–1690
50. **Ware, R. H.** Real-time national GPS networks for atmospheric sensing [Text] / R. H. Ware, D. W. Fulker, S. A. Stein et al. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2001. – V. 63. – No. 12. - P. 1315-1330.
51. **Азизов, А. А.** Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы [Текст] / А. А. Азизов, К. П. Гайкович, С. С. Кашкаров [и др.] // Изв. ВУЗов. Радиофизика. - 1998. - Т. 41, № 9. С. 1116-1125.
52. **Андрианов, В. А.** О влиянии атмосферы и ионосферы на точность современных навигационных и геодезических спутниковых измерений [Текст] / В. А. Андрианов, Н. А. Арманд // XV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн Алма-Ата -1997г. - с. 446.
53. **Андриенко, Ю. А.** Дисперсионные характеристики тропосферной линии связи в миллиметровом диапазоне волн [Текст] / Ю. А. Андриенко, Ю. М. Галаев [и др.] // Тез. докл. XV Всесоюзной конф. «Распространение радиоволн» Алма-Ата, -1987 – С. 267.
54. **Арманд, Н. А.** Распространение радиоволн в анизотропной турбулентной атмосфере [Текст] / Н. А. Арманд, И. Н. Кибардина, А. А. Ломакин // Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. М.: Наука. - 1986. - С. 5-15.

55. **Арсеньян, Т. И.** Статистические характеристики тропосферных неоднородностей, получаемые при измерениях флуктуаций электромагнитной волны на наклонной трассе [Текст] / Т. И. Арсеньян, А. А. Семенов // Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. М.: Наука. - 1986. - С. 200-208.
56. **Банах, В. А.** Определение интенсивности оптической турбулентности по обратному атмосферному рассеянию лазерного излучения [Текст] / В. А. Банах, И. Н. Смалихо // Оптика атмосферы и океана. - 2011. - т. 12, № 4. - С. 300-307.
57. **Варгин, П. Н.** Исследование динамических процессов в период формирования и развития блокирующего антициклона над европейской частью России летом 2010 г. [Текст] / П. Н. Варгин, А. Н. Лукьянов, А. В. Ганьшин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2012. - Т. 45, № 5. - С. 537-557.
58. **Васильев, А. А.** Методика применения сети станций спутникового позиционирования для мониторинга состояния атмосферы РТ [Текст] / А. А. Васильев, А. П. Шлычков, О. Г. Хуторова [и др.] // Журнал экологии и промышленной безопасности. - 2008. - № 3. - С. 26-28.
59. **Васильев, А. А.** Мониторинг вариаций влагосодержания атмосферы по данным системы приемников ГЛОНАСС-GPS в г. Казани [Текст] / А. А. Васильев, О. Г. Хуторова, Т. Р. Курбангалиев, // Сборник материалов конгресса «Чистая вода». - Казань. – 2010. – С. 319-321.
60. **Воронцов, А. М.** Моделирование протяженных фазовых экранов в задачах распространения оптического излучения в атмосфере [Текст] / А. М. Воронцов, Парамонов П. В. [Текст] // Известия вузов. Радиофизика. - 2006. Т. 49. № 1. С. 21-34.
61. **Глазунов, А. В.** Пространственные спектры и характерные горизонтальные масштабы флуктуаций температуры и скорости в конвективном пограничном слое атмосферы [Текст] / А. В. Глазунов, В. П. Дымников // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2013. - Т. 49, № 1. - С. 37-61

62. **Голицын, Г. С.** Динамика природных явлений [Текст] / Г. С. Голицын. // М. - ФИЗМАТЛИТ. - 2004. - 344 с.
63. Данные из архива погодных условий: <http://meteo.infospace.ru/>
64. **Гурвич, А. С.** Спектры сильных мерцаний за фазовым экраном с крупномасштабными анизотропными неоднородностями [Текст] / А. С. Гурвич, В. В. Воробьев, Д. А. Маракасов, О. В. Федорова // Известия вузов. Радиофизика. - 2007. - Т. 50, №9. - С. 747-765.
65. **Захаров, В. М.** Использование лазеров в ЦАО для исследования атмосферы / В. М. Захаров, О. К. Костко, В. У. Хаттатов // Оптика атмосферы и океана. - 2010. - Т. 23. - № 10. - С. 854-859.
66. **Зинин, Д. П.** Моделирование динамики поля коэффициента преломления радиоволн дециметрового диапазона в нижнем слое атмосферы [Текст] / Д. П. Зинин, Г. М. Тептин, О. Г. Хуторова, А. П. Шлычков // Доклады Академии Наук. - 2007. - Т. 416. - № 1. - С. - 112-114.
67. **Зинин, Д. П.** Исследование влияния квазиравнинного рельефа на локальную неоднородную структуру нижнего атмосферного слоя на основе моделирования и многолетнего эксперимента / Зинин Д. П., Хуторова О. Г., Тептин Г. М. [Текст] // Оптика атмосферы и океана. - 2006. - Т. 19. № 6. - С. 542-545.
68. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Редакция 5.1 [Текст] // М.: 2008. - 74 с.
69. **Исимару, А.** Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Том 1 // М.: Мир. - 1981. - 280 с
70. **Казаков, Л. Я.** Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере [Текст] / Л. Я. Казаков, А. Н. Ломакин // М. - Наука. - 1976. - 165 с.
71. **Кан, В.** Структура неоднородностей стратосферы по данным радиопросвечивания на трассах спутник-спутник [Текст] / С. С. Матюгов, О. И. Яковлев, В. Кан // Изв. вузов. - Радиофизика. - 2002. - Т. - 55, № 8. - С. - 651-656.

72. **Киселев, О.Н.** Мезомасштабные пространственно-временные флуктуации [Текст] // Доклады ТУСУРа.-2010-№ 1 (21), часть 2.
73. **Колмогоров, А.Н.** Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса [Текст] // Докл. АН СССР.-1941.-Т. 30, №4, -С. 299-303
74. **Куницын, В. Е.** Радиотомография ионосферы [Текст] / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева // М. - Физматлит. - 2007. - 336 с.
75. **Кутуза, Б. Г.** Особенности флуктуаций микроволнового излучения атмосферы. [Текст] // Успехи современной радиоэлектроники- 2003. -№ 1.-С. 36-43,
76. **Ламли, Дж.Л.** Структура атмосферной турбулентности. [Текст] / Ламли Дж. Л., Пановский Г. А// Москва: Б. и.,-1966.- 230 с.
77. **Логинов Н.В.** Сингулярное разложение матриц. // Москва: МГАПИ.,- 1996.-80 с.
78. **Лукин, И. П.** Флуктуации фазы оптических волн при конической фокусировке в турбулентной атмосфере. [Текст] // Оптика атмосферы и океана. - 2011. - т. 12, № 12. - С. 1066-1071.
79. **Мазин, И.П.** Облака и облачная атмосфера [Текст] / Мазин И.П., Хргиан А.Х // Ленинград, Гидрометиздат.- 1989 г. -647 с.
80. **Маракасов, Д. А.** Метод расчета момента функции распределения Вингера лазерных пучков в турбулентной атмосфере [Текст] / Д. А Маракасов, Д. С. Рычков // Оптика атмосферы и океана. - 2011. - т. 24, № 11. - С. 951-953.
81. **Малышев, В. В.** Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез, управление [Текст] / В. В. Малышев, М. Н. Красильщиков, В. Т. Бобронников, [и др] // М. - МАИ. -2000. - 568 с.
82. **Матвеев, Л. Т.** Курс общей метеорологии. Физика атмосферы [Текст] / Л. Т. Матвеев // Л. - Гидрометеиздат. - 1984 г. – 752 с.
83. **Метеословарь** [Электронный ресурс]. - <http://igras.ru/index.php>

84. **Одинцов, С.Л.** Исследования атмосферного пограничного слоя методами локальной и дистанционной акустической диагностики в ИОА СО РАН // Оптика атмосферы и океана. - 2009. - Т. 22. - № 10. - С. 981-987.
85. **Павельев, А. Г.** Спутниковый глобальный мониторинг атмосферы и ионосферы [Текст] / А. Г. Павельев, С. С. Матюгов, О. И. Яковлев // Радиотехника и электроника. - 2008. - Т. 53. - № 9. - С. - 1081-1093.
86. **Серापина, Б. Б.** Глобальные системы позиционирования Издание 3-е, исправленное и дополненное, М.-2002. -105 с.
87. **Стенин, Ю. М.** Распространение радиоволн. [Текст] // Казань: Издательство КГУ. - 2004. - 58 с.
88. **Татарский, В. И.** Теория флуктуационных явлений при распространении радиоволн в турбулентной атмосфере. [Текст] // Москва. Издательство академии наук СССР. - 1959 г. - 230 с.
89. **Татарский, В. И.** Распространение волн в турбулентной атмосфере [Текст] / В. И. Татарский // М. - Наука. - 1967 г. - 548 с.
90. **Тептин, Г. М.** Макротурбулентные характеристики средней и нижней атмосферы и рассеяние радиоволн. [Текст] // Казань центр информационных технологий. - 2004 г. - 157 с.
91. **Тептин, Г. М.** Исследование влияния макротурбулентности на распространение радиоволн по измерениям сети приемных станций ГЛОНАСС – GPS [Текст] / Г. М. Тептин, О. Г. Хуторова, А. А. Васильев [и др.] // Ученые записки Казанского университета. - 2010. - т. 152, Кн. 1. - С. 23-32.
92. **Тептин, Г. М.** Волновые возмущения локальных и синоптических масштабов по синхронным измерениям атмосферных примесей [Текст] / О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин // Доклады Академии наук. – 2005. - Т. 400. - № 1. С. 110-112.
93. **Тептин, Г. М.** Исследование мезомасштабных пространственно-временных вариаций тропосферы с помощью наземных наблюдений сигналов спутниковых навигационных систем [Текст] / О. Г. Хуторова, А. А. Васильев, А.

- М.Максимов [и др.] // Труды XXII Всероссийской конференции «Распространение радиоволн». -Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы ФГОУ ВПО «Южный федеральный университет» Ростов. - 2008. - том III. -С. 90-93.
94. **Тептин, Г.М.** Исследование тропосферных неоднородностей сетью станций приемников спутниковых навигационных систем [Текст] / О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин, А. А. Васильев [и др.] // Тез. международного симпозиума "Атмосферная Радиация и Динамика". - С. Пб. - 2009. -С. 53
95. **Тептин, Г.М.** Методика мониторинга состояния атмосферы РТ сетью станций спутниковых навигационных систем [Текст] / О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин, А. А. Васильев [и др.] // Материалы III научной конференции «Промышленная экология и безопасность». - Казань. -2008. - С. 154-155
96. **Тептин, Г.М.** Трехлетний цикл мониторинга атмосферы над территорией г. Казани программно-аппаратным комплексом сети приемников спутниковых навигационных систем и численной мезомасштабной модели [Текст] / О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин, А. А. Васильев [и др.] // Журнал экологии и промышленной безопасности. - 2010. - № 3 (47). - С. 96-97
97. **Федотова, О. В.** Спектры мерцаний, формируемых неоднородностей с переменной анизотропии. [Текст] // Оптика атмосферы и океана. - 2011. - т. 25, № 4. - С. 297-300.
98. **Хргиан, А. Х.** Физика атмосферы [Текст] / Хргиан, А. Х. // Л. - Гидрометеопиздат. -1969. - 646 с.
99. **Хуторов, В.Е.** Исследование мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления радиоволн в тропосфере методами численного моделирования / В.Е Хуторов., Г.М Тептин, Д.П. Зинин [и др] // Изв. Вузов. Радиофизика. - 2010. - т., №1. - С.1-13.
100. **Хуторов, В.Е.** О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS- ГЛОНАСС/ В.Е. Хуторов,

- О.Г. Хуторова, А.А. Васильев, //Оптика атмосферы и океана.- 2010.- т.23, № 6.- С. 510-514.
101. **Хуторов, В.Е.** Исследование влияния макротурбулентности на распространение радиоволн по измерениям сети приемных станций ГЛОНАСС и GPS/ В.Е. Хуторов, Г.М. Тептин, А.А. Журавлев [и др.] //Ученые записки Казанского университета .2010.- т.152, № 1.- С. 23-33.
102. **Хуторов, В.Е.** О возможности исследования горизонтальных структурных функций коэффициента преломления радиоволн в тропосфере с помощью сети приемных пунктов GPS – ГЛОНАСС/ В.Е.Хуторов, А.А.Журавлев, Г.М.Тептин //Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2012. -Т. 55, № 05.- С. 1-8.
103. **Хуторов, В.Е.** Пассивное зондирование структуры коэффициента преломления радиоволн в тропосфере сетью приёмников спутниковых навигационных систем в г.Казани / Хуторов В.Е., Тептин Г.М., Васильев [и др.] //Известия высших учебных заведений. Радиофизика. -2011.- Т. 54. № 01. -С. 1-8.
104. **Хуторов, В.Е.**Использование сети приемников ГЛОНАСС-GPS в региональных системах мониторинга //Журнал экологии и промышленной безопасности.- 2009. -№ 3. -С.26-29.
105. **Хуторов, В.Е.** О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы сетью приемников спутниковых навигационных систем/ А.А. Васильев, В.Е. Хуторов, Т.Р. Курбангалиев[и др.] // Тез. XIV Рабочей группы "Аэрозоли Сибири".- Томск.- 2007.- С.33.
106. **Хуторов, В.Е.** Исследование мезомасштабных пространственно-временных вариаций тропосферы с помощью наземных наблюдений сигналов спутниковых навигационных систем/ А.А.Васильев, А.М.Максимов, В.Е.Хуторов //Труды XXII всероссийской конференции «Распространение радиоволн» п.Лоо 22-29 сентября 2008, Изд-во Северо-Кавказского научно-

го центра высшей школы ФГОУ ВПО «Южный федеральный университет»
Ростов: -2008.- Т. III. С.90-93.

107. **Хуторов, В.Е.** Исследование тропосферных неоднородностей сетью станций приемников спутниковых навигационных систем / А.А. Васильев, В.Е. Хуторов, Т.Р. Курбангалиев[и др.]// Тез.международного симпозиума "Атмосферная Радиация и Динамика ".- С.Пб.- 2009.-С.53
108. **Хуторов, В.Е.** Решение задачи восстановления вертикальной и горизонтальной структуры метеопараметров по радиосигналам спутниковых навигационных систем / Васильев А.А., Хуторов В.Е.// Труды Всероссийской научной конференции «Изменяющаяся окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований». Казань: 2009- Т.2.-С.42-45.
109. **Хуторов, В.Е.** Исследование структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS- ГЛОНАСС в г. Казани // Тез. XVI группы “Аэрозоли Сибири” Томск.- 2009.- С.31.
110. **Хуторов, В.Е.** Влияние горизонтальных градиентов индекса рефракции на радио измерения сети приемников GPS- ГЛОНАСС //сборник докладов второй волжской региональной молодежной конференции “Радиофизические исследования природных сред и информационные системы” г. Зеленодольск, 2009
111. **Хуторов, В.Е.** Исследование проявлений макротурбулентности по измерениям сетей мониторинга в г. Казани / В.Е.Хуторов, А.А. Журавлев // Тез. XVII группы “Аэрозоли Сибири” Томск. -2010.- С.97.
112. **Хуторов, В.Е.** Проявление макротурбулентности в измерениях сети спутникового мониторинга//Сборник тезисовМСАРД-2011 С.-Пб. - 2009.- С.47.
113. **Хуторов, В.Е.** Мониторинг тропосферы аппаратно-программным комплексом сети станций приемников спутниковых навигационных систем и численной мезомасштабной модели / В.Е.Хуторов,

- А.А.Васильев,В.В.Каллиников[и др.]//Сборник тезисовМСАРД-2011 С.-Пб. : 2009.- С.60.
114. **Хуторов, В.Е.** Исследование вертикальной изменчивости неоднородной структуры тропосферы с помощью систем спутниковой навигации // Тез. XVIII группы “Аэрозоли Сибири” Томск. - 2011.- С.85
115. Хуторов, В.Е. Временная изменчивость мезомасштабной структуры тропосферы // Тез. XIX Рабочей группы "Аэрозоли Сибири".- Томск.- 2012.- С.48.
116. **Черный,Ф. Б.**Распространение радиоволн [Текст] /Ф. Б. Черный // Изд. 2-е. М. -Советское радио. - 1972 г. -464 с.
117. **Чукин,В.В.**Дистанционное зондирование водяного пара в атмосфере с помощью навигационных спутниковых систем. [Текст] /В. В.Чукин // 2008.
118. **Шакина, Н.П.**Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере [Текст] //Шакина.—Л. : Гидрометеиздат.-1990. —308с
119. **Яковлев,О.И.**Космическая радиофизика [Текст] / О. И. Яковлев// М.: Научная книга. - 1998. - 432 с.
120. **Яценков, В.С.**Основы спутниковой навигации. Системы GPSNAVS-TAR ГЛОНАСС.[Текст] //- М: горячая линия – Телеком.-2005. -272 с.

Приложения

Приложение 1

Анализ личного вклада автора в публикациях в ведущих научных журналах

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и индексированных в SCOPUS:

[23,102] – диссертант занимался организацией, подготовкой и проведением эксперимента по измерению сигналов СНС. Им проведен большой объем работ по обработке данных о радиотрассах сигналов систем спутниковой навигации, им обнаружены вариации зенитной тропосферной задержки радиоволн, вызванные мезомасштабными процессами, им проведен анализ полученных закономерностей. Вклад соавторов выразился в расчетах закономерностей мезомасштабных вариаций метеопараметров по трехлетним ежеминутным измерениям сети наземных метеостанций.

[22,99]-проведением эксперимента по измерению сигналов СНС. Им проведен большой объем работ по обработке данных о радиотрассах сигналов систем спутниковой навигации, им обнаружены вариации горизонтальные вариации индекса рефракции с помощью структурных функций различных на высотах. Вклад соавторов выразился в моделировании неоднородной структуры атмосферы с помощью WRF.

[21] – диссертантом по многолетним измерениям был проведен большой объем работ по обработке данных о радиотрассах сигналов систем. Им рассчитаны структурные характеристики атмосферных процессов. Вклад соавторов - расчет полей влажности, сравнение экспериментальных данных с данными полученными с помощью фотометра.

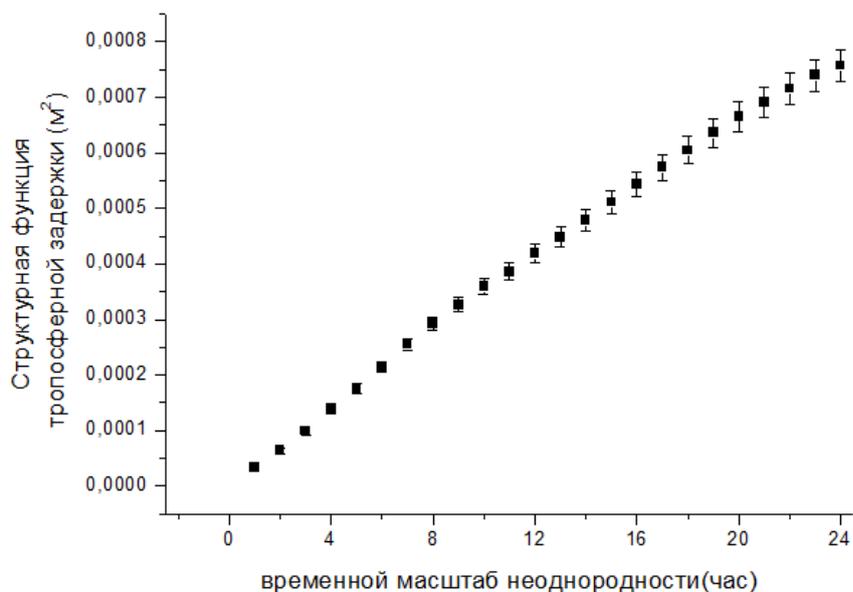
[20,101, 27]– диссертант занимался организацией, подготовкой и проведением эксперимента по измерению сигналов СНС. Диссертантом разработана и

применена оригинальная методика анализа неоднородной структуры тропосферы по данным сигналов GPS-ГЛОНАСС. Им решены задачи восстановления пространственной структуры тропосферных задержек радиосигналов по измерениям радиотрасс сигналов GPS-ГЛОНАСС, ее динамики и ее сравнению с модельными данными. Вклад соавторов - расчет неоднородного поля коэффициента преломления в атмосфере с помощью численного моделирования и исследование результатов численного эксперимента.

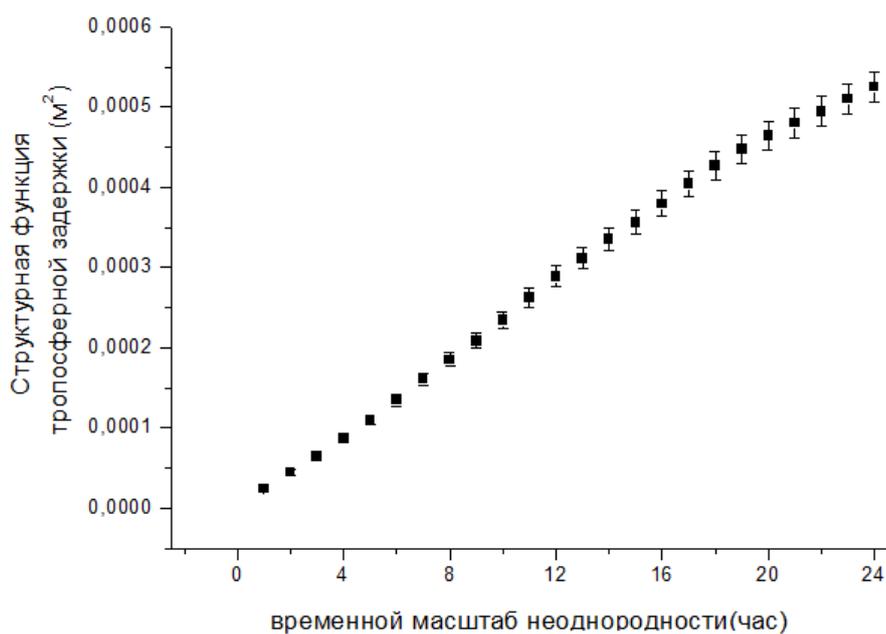
[19,100]- диссертантом проведено исследование воздействия вариаций горизонтальной структуры тропосферы в мезометорологическом масштабе на распространение радиоволн дециметрового диапазона. Обнаружены статистически надежные закономерности атмосферных процессов и их влияние на радиоволны систем спутниковой навигации. Вклад соавторов выразился в расчетах закономерностей вертикальных вариаций тропосферы.

Временные структурные функции и их доверительные интервалы

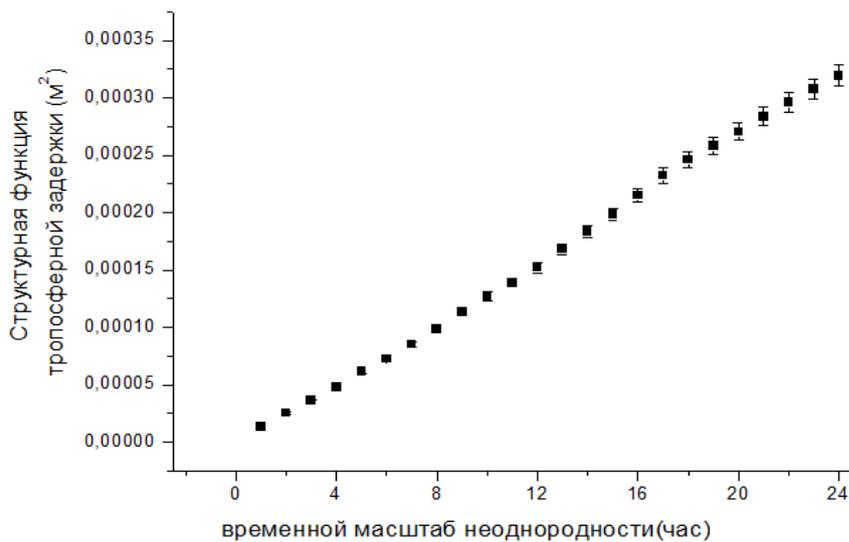
Временная структурная функция для различных сезонов, 2010 г.



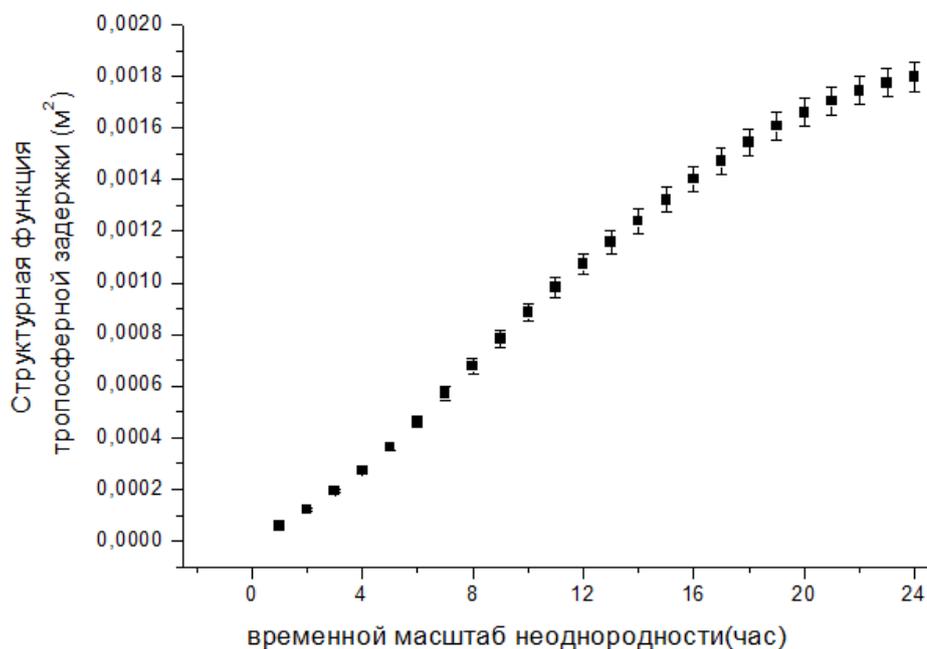
Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности. г.Казань. Октябрь 2009



Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности. г.Казань. Апрель 2010



Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности. г.Казань. Январь 2010



Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности. г.Казань. Июнь 2010

Таблица 5 Сезонный ход значений временной структурной функции зенитной тропосферной задержки в зависимости от временного масштаба

2010 г.

Номер месяца	Временной масштаб Неоднородности(час)	Значение структурной функции (м ²)	Стандартное отклонение
1	1	1,3*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁷
1	2	2,5*10 ⁻⁵	9*10 ⁻⁷
1	3	3,5*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁶
1	4	4,7*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁶
1	5	6,1*10 ⁻⁵	2*10 ⁻⁶
1	6	7,2*10 ⁻⁵	2,*10 ⁻⁶
1	7	8,5*10 ⁻⁵	2*10 ⁻⁶
1	8	9,8*10 ⁻⁵	2*10 ⁻⁶
1	9	1,1*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁶
1	10	1,2*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁶
1	11	1,3*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁶
1	12	1,5*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁶
1	13	1,6*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁶
1	14	1,8*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁶
1	15	1,9*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁶
1	16	2,1*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁶
1	17	2,3*10 ⁻⁴	6*10 ⁻⁶
1	18	2,410 ⁻⁴	6*10 ⁻⁶
1	19	2,510 ⁻⁴	7*10 ⁻⁶
1	20	2,7*10 ⁻⁴	7*10 ⁻⁶
1	21	2,8*10 ⁻⁴	8*10 ⁻⁶

Номер месяца	Временной масштаб Неоднородности(час)	Значение структурной функции (м ²)	Стандартное отклонение
1	22	2,9*10 ⁻⁴	8*10 ⁻⁶
1	23	3*10 ⁻⁴	8*10 ⁻⁶
1	24	3,1*10 ⁻⁴	8*10 ⁻⁶
3	1	1,8*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁶
3	2	3,9*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁶
3	3	5,9*10 ⁻⁵	2*10 ⁻⁶
3	4	8,2*10 ⁻⁵	3*10 ⁻⁶
3	5	1*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁶
3	6	1,2*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁶
3	7	1,5*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁶
3	8	1,8*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁶
3	9	2,1*10 ⁻⁴	6*10 ⁻⁶
3	10	2,4*10 ⁻⁴	7*10 ⁻⁶
3	11	2,8*10 ⁻⁴	8*10 ⁻⁶
3	12	3,1*10 ⁻⁴	9*10 ⁻⁶
3	13	3,5*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	14	3,9*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	15	4,2*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	16	4,6*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	17	5,0*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	18	5,4*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	19	5,7*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	20	6,0*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	21	6,4*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	22	6,9*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵

Номер месяца	Временной масштаб Неоднородности(час)	Значение структурной функции (м ²)	Стандартное отклонение
3	23	7,3*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
3	24	7,8*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁵
5	1	4,7*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁶
5	2	1*10 ⁻⁴	8*10 ⁻⁶
5	3	1,7*10 ⁻⁴	1,2*10 ⁻⁵
5	4	2,4*10 ⁻⁴	1,5*10 ⁻⁵
5	5	3,1*10 ⁻⁴	1,7*10 ⁻⁵
5	6	3,7*10 ⁻⁴	1,9*10 ⁻⁵
5	7	4,4*10 ⁻⁴	2,1*10 ⁻⁵
5	8	5,0*10 ⁻⁴	2,3*10 ⁻⁵
5	9	5,7*10 ⁻⁴	2,5*10 ⁻⁵
5	10	6,3*10 ⁻⁴	2,8*10 ⁻⁵
5	11	6,9*10 ⁻⁴	3,*10 ⁻⁵
5	12	7,4*10 ⁻⁴	3,1*10 ⁻⁵
5	13	7,8*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁵
5	14	8,2*10 ⁻⁴	3,4*10 ⁻⁵
5	15	8,5*10 ⁻⁴	3,6*10 ⁻⁵
5	16	8,9*10 ⁻⁴	3,9*10 ⁻⁵
5	17	9,2*10 ⁻⁴	4,1*10 ⁻⁵
5	18	9,5*10 ⁻⁴	4,3*10 ⁻⁵
5	19	9,8*10 ⁻⁴	4,4*10 ⁻⁵
5	20	0,00101	4,4*10 ⁻⁵
5	21	0,00103	4,3*10 ⁻⁵
5	22	0,00106	4,2*10 ⁻⁵
5	23	0,00109	4,3*10 ⁻⁵

Номер месяца	Временной масштаб Неоднородности(час)	Значение структурной функции (м ²)	Стандартное отклонение
5	24	0,00113	4,4*10 ⁻⁵
7	1	9,2*10 ⁻⁵	1,3*10 ⁻⁵
7	2	1,8*10 ⁻⁴	1,9*10 ⁻⁵
7	3	2,6*10 ⁻⁴	2,2*10 ⁻⁵
7	4	3,3*10 ⁻⁴	2,4*10 ⁻⁵
7	5	4,1*10 ⁻⁴	2,7*10 ⁻⁵
7	6	5,0*10 ⁻⁴	2,9*10 ⁻⁵
7	7	5,9*10 ⁻⁴	3,1*10 ⁻⁵
7	8	7*10 ⁻⁴	3,5*10 ⁻⁵
7	9	8,1*10 ⁻⁴	3,8*10 ⁻⁵
7	10	9*10 ⁻⁴	4,1*10 ⁻⁵
7	11	9,8*10 ⁻⁴	4,1*10 ⁻⁵
7	12	0,001	4,3*10 ⁻⁵
7	13	0,0011	4,5*10 ⁻⁵
7	14	0,0012	4,7*10 ⁻⁵
7	15	0,0012	4,8*10 ⁻⁵
7	16	0,0013	4,9*10 ⁻⁵
7	17	0,0014	5*10 ⁻⁵
7	18	0,0014	5,1*10 ⁻⁵
7	19	0,0015	5,2*10 ⁻⁵
7	20	0,0015	5,2*10 ⁻⁵
7	21	0,0016	5,4*10 ⁻⁵
7	22	0,0017	5,6*10 ⁻⁵
7	23	0,0017	5,7*10 ⁻⁵
7	24	0,0018	5,8*10 ⁻⁵

Номер месяца	Временной масштаб Неоднородности(час)	Значение структурной функции (м ²)	Стандартное отклонение
9	1	6,3*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵
9	2	1,3*10 ⁻⁴	1,4*10 ⁻⁵
9	3	1,8*10 ⁻⁴	1,5*10 ⁻⁵
9	4	2,3*10 ⁻⁴	1,7*10 ⁻⁵
9	5	2,8*10 ⁻⁴	1,9*10 ⁻⁵
9	6	3,2*10 ⁻⁴	1,9*10 ⁻⁵
9	7	3,7*10 ⁻⁴	2,1*10 ⁻⁵
9	8	4,2*10 ⁻⁴	2,3*10 ⁻⁵
9	9	4,5*10 ⁻⁴	2,4*10 ⁻⁵
9	10	4,7*10 ⁻⁴	2,4*10 ⁻⁵
9	11	4,9*10 ⁻⁴	2,4*10 ⁻⁵
9	12	5,1*10 ⁻⁴	2,4*10 ⁻⁵
9	13	5,4*10 ⁻⁴	2,5*10 ⁻⁵
9	14	5,7*10 ⁻⁴	2,7*10 ⁻⁵
9	15	6*10 ⁻⁴	2,9*10 ⁻⁵
9	16	6,3*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁵
9	17	6,4*10 ⁻⁴	3,1*10 ⁻⁵
9	18	6,6*10 ⁻⁴	3,2*10 ⁻⁵
9	19	6,9*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁵
9	20	7,2*10 ⁻⁴	3,4*10 ⁻⁵
9	21	7,4*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁵
9	22	7,5*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁵
9	23	7,7*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁵
9	24	7,8*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁵
11	1	3,5*10 ⁻⁵	5,3*10 ⁻⁶

Номер месяца	Временной масштаб Неоднородности(час)	Значение структурной функции (м ²)	Стандартное отклонение
11	2	7,3*10 ⁻⁵	8,7*10 ⁻⁶
11	3	1,1*10 ⁻⁴	1,1*10 ⁻⁵
11	4	1,6*10 ⁻⁴	1,3*10 ⁻⁵
11	5	2*10 ⁻⁴	1,5*10 ⁻⁵
11	6	2,4*10 ⁻⁴	1,7*10 ⁻⁵
11	7	2,8*10 ⁻⁴	1,8*10 ⁻⁵
11	8	3,2*10 ⁻⁴	1,9*10 ⁻⁵
11	9	3,6*10 ⁻⁴	2,1*10 ⁻⁵
11	10	4,0*10 ⁻⁴	2,2*10 ⁻⁵
11	11	4,3*10 ⁻⁴	2,3*10 ⁻⁵
11	12	4,6*10 ⁻⁴	2,4*10 ⁻⁵
11	13	5*10 ⁻⁴	2,5*10 ⁻⁵
11	14	5,358*10 ⁻⁴	2,6*10 ⁻⁵
11	15	5,7*10 ⁻⁴	2,8*10 ⁻⁵
11	16	5,9*10 ⁻⁴	2,9*10 ⁻⁵
11	17	6,2*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁵
11	18	6,4*10 ⁻⁴	3,1*10 ⁻⁵
11	19	6,7*10 ⁻⁴	3,3*10 ⁻⁵
11	20	6,9*10 ⁻⁴	3,4*10 ⁻⁵
11	21	7,1*10 ⁻⁴	3,6*10 ⁻⁵
11	22	7,3*10 ⁻⁴	3,7*10 ⁻⁵
11	23	7,5*10 ⁻⁴	3,8*10 ⁻⁵
11	24	7,7*10 ⁻⁴	3,8*10 ⁻⁵
12	1	1,3*10 ⁻⁵	7,6*10 ⁻⁷
12	2	2,9*10 ⁻⁵	1,6*10 ⁻⁶

Номер месяца	Временной масштаб Неоднородности(час)	Значение структурной функции (м ²)	Стандартное отклонение
12	3	4,9*10 ⁻⁵	2,5*10 ⁻⁶
12	4	7*10 ⁻⁵	3,3*10 ⁻⁶
12	5	8,8*10 ⁻⁵	3,9*10 ⁻⁶
12	6	1,*10 ⁻⁴	4,4*10 ⁻⁶
12	7	1,2*10 ⁻⁴	5*10 ⁻⁶
12	8	1,4*10 ⁻⁴	5,9*10 ⁻⁶
12	9	1,7*10 ⁻⁴	7,4*10 ⁻⁶
12	10	2*10 ⁻⁴	9,1*10 ⁻⁶
12	11	2,3*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
12	12	2,6*10 ⁻⁴	1,1*10 ⁻⁵
12	13	2,9*10 ⁻⁴	1,2*10 ⁻⁵
12	14	3,2*10 ⁻⁴	1,3*10 ⁻⁵
12	15	3,5*10 ⁻⁴	1,5*10 ⁻⁵
12	16	3,8*10 ⁻⁴	1,5*10 ⁻⁵
12	17	4*10 ⁻⁴	1,6*10 ⁻⁵
12	18	4,3*10 ⁻⁴	1,8*10 ⁻⁵
12	19	4,6*10 ⁻⁴	1,9*10 ⁻⁵
12	20	4,9*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁵
12	21	5,2*10 ⁻⁴	2,1*10 ⁻⁵
12	22	5,4*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁵
12	23	5,7*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁵
12	24	5,9*10 ⁻⁴	2*10 ⁻⁵

Пространственные структурные их доверительные интервалы

Таблица 6 Суточный ход значений структурной функции зенитной тропосферной задержки 23 августа 2009

Местное время (час)	Горизонтальное расстояние (км)	Значение структурной функции (m^2)	Стандартное отклонение
3	0,0944	0,0012	$2,9 \cdot 10^{-5}$
3	0,8506	0,0016	$4,9 \cdot 10^{-5}$
3	4,5002	0,0012	$7 \cdot 10^{-5}$
3	18,1819	0,0054	$8,8 \cdot 10^{-5}$
3	22,173	0,0032	$1, \cdot 10^{-4}$
3	35,9642	0,0052	$1,2 \cdot 10^{-4}$
6	4,5002	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
6	13,852	0,004	$1,7 \cdot 10^{-4}$
6	18,1819	0,002	$2 \cdot 10^{-4}$
6	22,173	0,032	$2,3 \cdot 10^{-4}$
10	0,0944	0,001	$2,6 \cdot 10^{-4}$
10	4,5002	0,0019	$2,9 \cdot 10^{-4}$
10	13,852	0,001	$3,2 \cdot 10^{-4}$
10	18,1819	0,018	$3,5 \cdot 10^{-4}$
10	22,173	0,036	$3,8 \cdot 10^{-4}$
10	35,9642	0,007	$4 \cdot 10^{-4}$
12	0,0944	0,013	$4,3 \cdot 10^{-4}$
12	0,8506	0,011	$4,6 \cdot 10^{-4}$
12	4,5002	0,015	$4,9 \cdot 10^{-4}$
12	13,852	0,004	$5,2 \cdot 10^{-4}$

Местное время (час)	Горизонтальное расстояние (км)	Значение структурной функции (m^2)	Стандартное отклонение
12	18,1819	0,021	$5,4 \cdot 10^{-4}$
12	22,173	0,014	$5,7 \cdot 10^{-4}$
12	35,9642	0,06	$5,9 \cdot 10^{-4}$
16	0,0944	0,0012	$1,1 \cdot 10^{-4}$
16	4,5002	0,0013	$1,6 \cdot 10^{-4}$
16	13,852	0,0011	$2 \cdot 10^{-4}$
16	18,1819	0,01	$2,4 \cdot 10^{-4}$
16	22,173	0,09	$2,8 \cdot 10^{-4}$
16	35,9642	0,03	$3,2 \cdot 10^{-4}$
18	4,5002	0,0011	$3,6 \cdot 10^{-4}$
18	13,852	0,0022	$4,0 \cdot 10^{-4}$
18	18,1819	0,0011	$4,3 \cdot 10^{-4}$
21	0,8506	$1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$
21	4,5002	0,0045	$5 \cdot 10^{-4}$
21	13,852	0,0038	$5,358 \cdot 10^{-4}$
21	18,1819	0,01	$5,7 \cdot 10^{-4}$
21	22,173	0,005	$5,9 \cdot 10^{-4}$
21	35,9642	0,0054	$6,2 \cdot 10^{-4}$

Таблица 7 Вертикальная вариация структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0.85 - 35 км за 17.06.09

Горизонтальное расстояние (км)	высота (м)	Значение структурной функции (m^2)	Стандартное отклонение
4,5	14140	0,415	0,0012
4,5	10770	$6,05 \cdot 10^{-4}$	0,00016
4,5	8205	0,055	0,0012
4,5	5850	0,0552	0,0054
4,5	3193	0,09336	0,0032
4,5	1486	0,29999	0,0052
4,5	894	2,83282	1,05
4,5	453	3,31419	1,4
4,5	116	3,46531	1,2
13,8	14140	0,00124	0,00032
13,8	10770	0,01976	0,001
13,8	8205	0,01381	0,0019
13,8	5850	0,01976	0,001
13,8	3193	0,09336	0,018
13,8	1486	0,0552	0,036
13,8	894	0,0552	0,007
13,8	453	0,013	0,013
13,8	116	6,733	1,011
18,18	14140	0,465	0,015
18,18	10770	3,579	0,54
18,18	8205	5,198	1,02
18,18	5850	7,454	1,014

Горизонтальное расстояние (км)	высота (м)	Значение структурной функции (m^2)	Стандартное отклонение
18,18	3193	35,39	2,6
18,18	1486	21,12	2,12
18,18	894	0,242	0,0013
18,18	453	5,25	1,0011
18,18	116	38,7	2,1
22,17	14140	0,29	0,09
22,17	10770	2,3011	1,3
22,17	8205	3,33	1,11
22,17	5850	4,77	1,22
22,17	3193	13,3	2,15
22,17	1486	22,5	2,4
22,17	894	3,34	1,21
22,17	453	24,5	1,22
22,17	116	48,5	2,15

Таблица 8 Вертикальная вариация структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов СНС в интервале масштабов 0,85 - 24 км за 12.02.09

Горизонтальное расстояние (км)	высота (м)	Значение структурной функции	Стандартное отклонение
4,5	116	0,1	0,001
4,5	453	0,013	0,0001
4,5	894	0,0552	0,0012
4,5	1486	0,0552	0,0054
4,5	3193	0,093	0,0032

Горизонтальное расстояние (км)	высота (м)	Значение структурной функции	Стандартное отклонение
4,5	5850	0,019	0,0052
4,5	8205	0,01381	0,005
4,5	10770	0,00953	0,004
4,5	14140	0,0012	0,0002
13,8	116	0,081	0,0003
13,8	453	0,0112	0,001
13,8	894	4,8E-4	0,00002
13,8	1486	0,044	0,001
13,8	3193	0,075	0,018
13,8	5850	0,015	0,036
13,8	8205	0,011	0,007
13,8	10770	0,007	0,0013
13,8	14140	0,001	0,0011
18,18	116	6,375	1,15
18,18	453	0,869	0,54
18,18	894	0,038	0,0002
18,18	1486	3,464	1,014
18,18	3193	5,858	2,6
18,18	5850	1,239	0,12
18,18	8205	0,866	0,0013
18,18	10770	0,597	0,011
18,18	14140	0,077	0,01
22,17	116	24,54	2,09
22,17	453	3,346	1,3
22,17	894	0,146	0,11
22,17	1486	13,33	1,22

Горизонтальное расстояние (км)	высота (м)	Значение структурной функции	Стандартное отклонение
22,17	3193	22,54	2,15
22,17	5850	4,771	2,4
22,17	8205	3,336	1,21
22,17	10770	2,301	1,22
22,17	14140	0,29	0,15