

Хуторов Владислав Евгеньевич

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

специальность 01.04.03 - радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Казань – 2014

Работа выполнена на кафедре радиоастрономии Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Научный руководитель:

Непогодин Иосиф Андреевич,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Выборнов Федор Иванович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела
мониторинга верхней атмосферы Земли
на основе контролируемых воздействий
Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Научно-исследовательский
радиофизический институт».

Губенко Владимира Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник
лаб. «Распространение радиоволн в
космосе» Фрязинского филиала
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН.

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский государственный университет (г. Томск) радиофизический факультет.

Защита диссертации состоится 19 декабря 2014 г., в 12-00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе ФБГУН Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, Моховая ул., 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html> .

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Потапов
Александр Алексеевич

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена экспериментальным исследованиям неоднородной структуры тропосферы с помощью радиосигналов спутниковых навигационных систем. Проводится исследование структурных характеристик мезомасштабных процессов с помощью радиосигналов дециметрового диапазона, измеренных наземной сетью приемников GPS-ГЛОНАСС.

Объект исследования и 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, повышение точности радиотехнических измерений, опасных метеоявлений. Известно, что учет мезомасштабной структуры атмосферы улучшает качество решения указанных задач.

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).

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. 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 качестве количественной характеристики исследуемых процессов используется структурная функция индекса рефракции и тропосферной задержки дециметровых радиоволн.

В настоящее время такие системы как NAVASTAR (GPS) и ГЛОНАСС все чаще входят в научную деятельность, их используют для целей дистанционного зондирования атмосферы. 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 – мезомасштабов на 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 м² достигает в летний период, а минимальные в 0,0003 м²- 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 [5](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 [1, 2]

- 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 [3, 4] 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.
- 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 тропосферы .

Практическая ценность работы

Полученные результаты уточняют и развивают метод дистанционного радиозондирования неоднородной структуры тропосферы.

Методика оценки неоднородной 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 РТ 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, 2012 и 2013 гг.; Второй Волжской региональной молодежной научной конференции «Радиофизические исследования природных сред и информационные системы», Казань, 2010; всероссийской научной конференции «Изменяющаяся 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 «Progress In Electromagnetic Research», Москва, 2012, международной конференции «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» 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 работы. Из них 18 статей в научных журналах (из них 5 в журналах, рекомендованных ВАК, 5 индексированы в базе SCOPUS), 3 статьи в сборниках трудов научных конференций, 13 опубликованных тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 126 страниц печатного текста, в том числе 32 рисунка, 8 таблиц. Список литературы содержит 118 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 в тропосфере 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.

Во второй главе описаны принципы исследования атмосферы по радиоизмерениям сети приемников ГНСС, даны спецификации и описание использованной аппаратуры. 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.1 представлена одна из конфигураций сети используемая для мониторинга атмосферы.

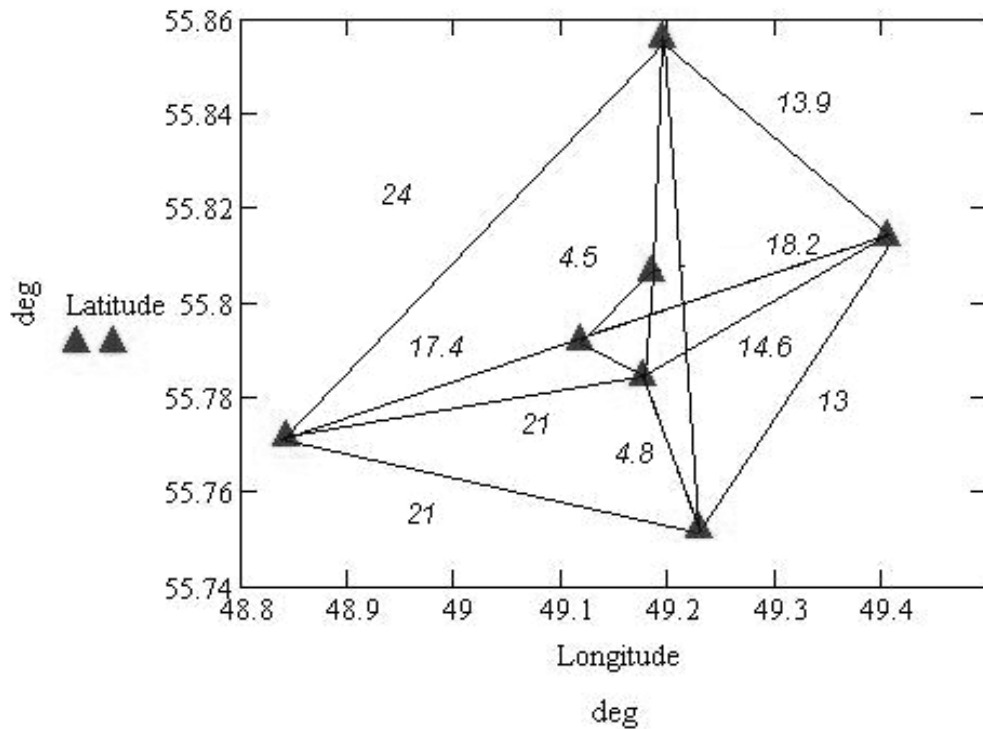


Рис.1 Расположение сети приемных станций ГНСС GPS – ГЛОНАСС в г. Казань, цифрами обозначены расстояния между станциями в км.

Приемники сети разнесены на расстояние от 1 до 35 км. Такое пространственное разрешение позволяет оценивать структуру тропосферы в области мезомасштабных процессов.

Основными параметрами, зависящими от состояния атмосферы и влияющими на распространение радиоволн, являются индекс рефракции

$$N = (n - 1) \cdot 10^6, \text{ коэффициент преломления}$$

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

здесь: p - давление воздуха [мБар], T - температура [К], e –давление водяного пара [мБар]. Задержка радиосигнала GPS-ГЛОНАСС в тропосфере определяется выражением:

$$\Delta T = \int (n - 1) dl$$

Интеграл по берется по радиотрассе от спутника до приемника.

Фазовые измерения (пути радиосигналов от спутника до приемника, оцененные по фазе принятого сигнала) двухчастотного многоканального приемника ГНСС, для j -го спутника можно записать как:

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

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

где $\rho_{0,j}$ – истинное расстояние, I_j – ионосферная задержка, ΔT_j – тропосферная задержка, ξ_j – прочие ошибки, в том числе обусловленные ошибками часов приемника и спутника, $N_j \lambda$ – фазовые неоднозначности, f_1 , f_2 – частоты радиосигналов СНС. Все слагаемые измеряются в метрах.

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 I из фазовых измерений. Правильный выбор местоположения приемника позволяет минимизировать ошибки многолучевости. Используются измерения со спутников с углами места $> 5^\circ$.

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

Получены оценки точности дифференциальных фазовых измерений радиосигналов ГНСС. 98% выборок дифференциальных фазовых измерений имеют нормальное распределение шума. Среднеквадратическое отклонение двойной разности фаз равно 0,002 м.

Описывается разработанный метод, позволяющий производить мониторинг тропосферной задержки дециметровых радиоволн в области мезомасштабов.

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 GPS и ГЛОНАСС от каждого спутника до каждой антенны приемной сети. Истинную дальность ρ исключают из измерений с помощью точных эфемерид полученных с сайта службы GNSS. Для исключения ионосферного воздействия на длину фазового пути используются двухчастотные измерения, позволяющие составлять ионосферно-свободные комбинации. 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 ξ .

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

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

Эти функции оценивают вклад нейтральной атмосферы в ΔT в зависимости от зенитного угла радиотрассы z и применяются для учета искривления радиотрассы. Применяются картирующие функции при углах $z > 70^\circ$. 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.

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

Сравнение горизонтальной структуры тропосферной задержки радиоволн и ее суточной динамики с результатами численного моделирования показало их хорошее соответствие. Пример сравнения суточного хода зенитной тропосферной задержки радиоволн полученной по численной модели атмосферы и в эксперименте представлен на Рис.2

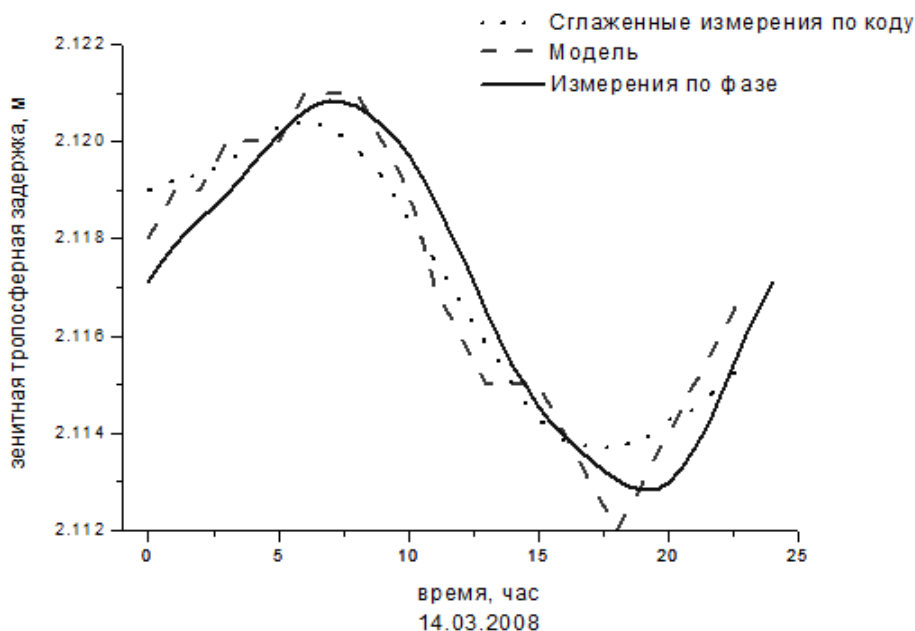


Рис. 2 Суточная динамика зенитной тропосферной задержки 14.03.08

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

Физический смысл структурной функции есть среднее квадрата флуктуаций исследуемой величины в области соответствующих пространственных или временных масштабов в процессах со стационарным приращением.

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.

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

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

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 и по пространству. Сама структурная функция и ее степенная аппроксимация является количественной характеристикой неоднородной структуры тропосферы.

На Рис. 3 представлен пример структурной функции, полученной по данным сети приемников ГНСС.

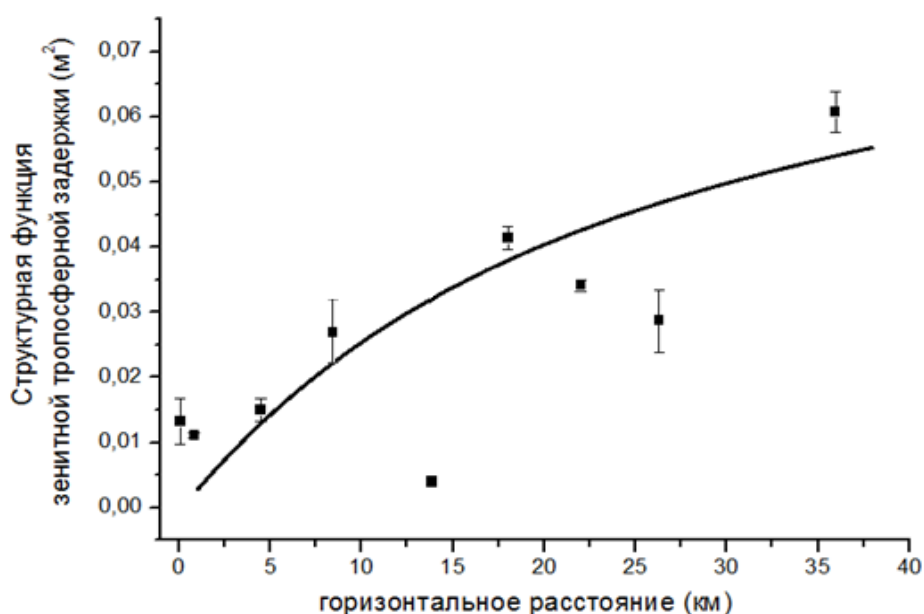


Рис.3 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г. на сети приемных пунктов

СНС в интервале масштабов 0. 85 -35 км, доверительные интервалы показывают величину стандартного отклонения

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. Наблюдаемый разброс в расчетных точках связан с орографическими особенностями областей, в которых расположены станции GPS-ГЛОНАСС и возможным проявлением когерентных структур.

Производилась оценка дисперсии разности зенитной тропосферной задержки при горизонтальном разnose приемных антенн от 12, 5 м до 100 м. 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.4 представлена оценка дисперсии разности тропосферной задержки при малых наземных базах за 29.12.09.

Значения структурной функции меняются незначительно и при размерах базы до 26 метров. 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. Проведенные измерения дисперсии разности тропосферной задержки по малой базе показали, что точность измерения пространственной структурной функции равна 0.00012 м^2

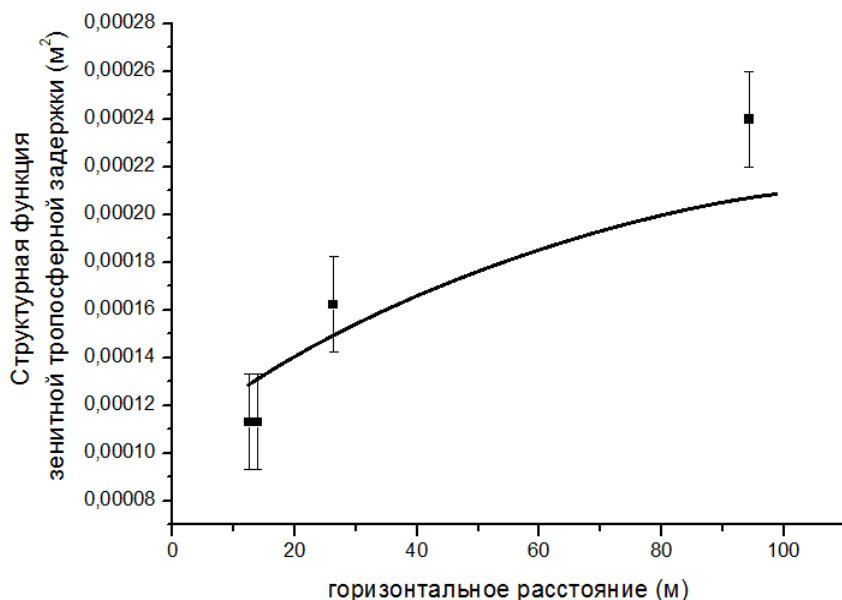


Рис. 4 Структурная функция зенитной тропосферной задержки за 29.12.09, доверительные интервалы показывают величину стандартного отклонения.

Для того, чтобы сравнить влияние ионосферы и тропосферы на структурные функции атмосферной задержки радиоволн, в августе 2009 г. проводился эксперимент с помощью измерений двухчастотных приемников. Пример полученных структурных функций приведен на Рис.5.

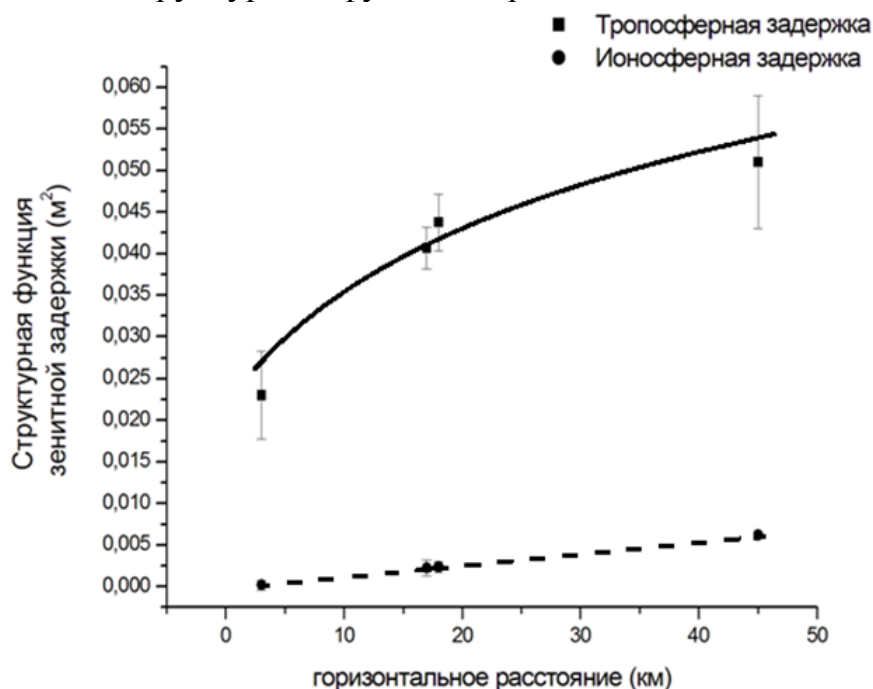


Рис. 5 Структурные функции наклонных атмосферных задержек радиосигналов СНС для 20.08. 2009 15:00-16:00 UTC, доверительные интервалы показывают величину стандартного отклонения.

Показано, что на исследуемом масштабе неоднородностей от 0,8 до 45 км вклад флуктуаций ионосферы в структурную функцию задержки мал по сравнению с вкладом тропосферы.

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 по формуле

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

Для Δt , брались значения от 5 минут до 24 часов. Рассчитывалось среднее значение для каждого Δt . Значения структурной функции были аппроксимированы степенной функцией

$$D(\tau) = C\tau^a$$

На Рис. 6 представлен пример временной структурной функции измерений за годовой период.

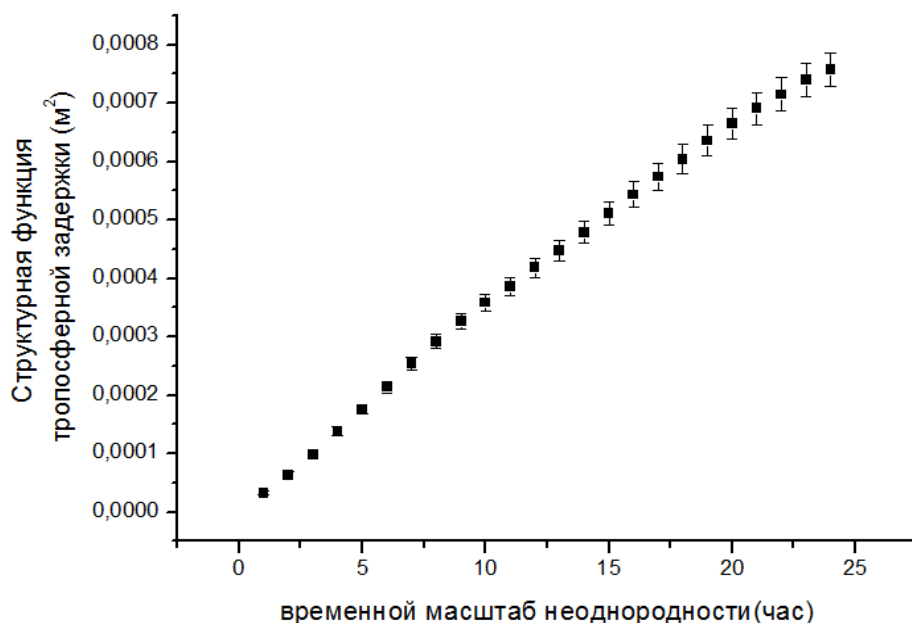


Рис. 6 Структурная функция зенитных тропосферных задержек радиосигналов в зависимости от временного масштаба неоднородности. г. Казань за 2010 г.

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, доверительные интервалы показывают величину стандартного отклонения.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты исследования суточных, сезонных и высотных закономерностей мезомасштабных процессов в тропосфере с помощью структурных функций тропосферных задержек и индекса рефракции дециметровых радиоволн.

На Рис. 7 приведен график типичного суточного хода горизонтальной структурной функции зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн. Цветовая шкала - величина структурной функции в м². 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 для масштабов неоднородностей больше 20 км. Показатель аппроксимирующей степенной функции в дневное время максимален и равен 0,7. Для утренних и вечерних измерений показатель степени равен 0,1-0,2.

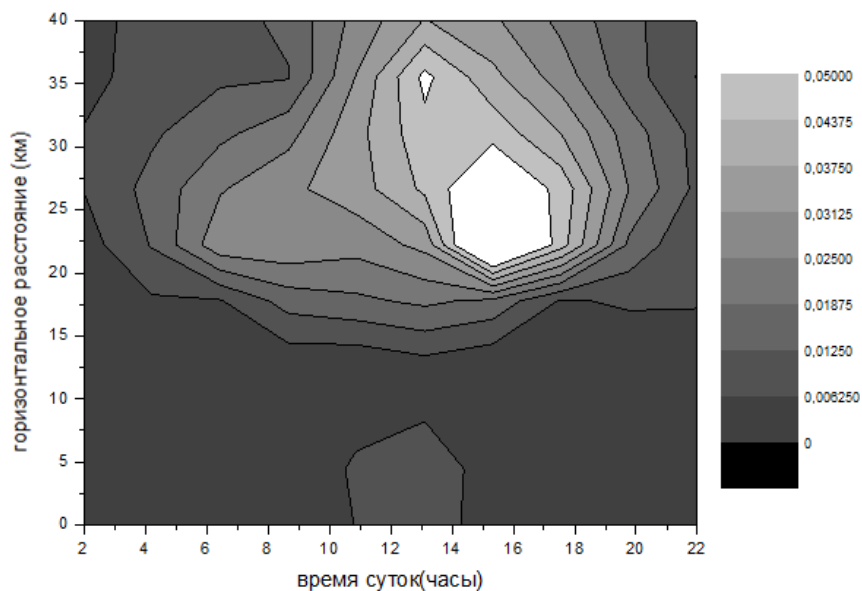


Рис. 7 Суточный ход значений структурных функций зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009г.

Такое поведение структурной функции означает, что в дневные часы увеличивается величина дисперсии индекса рефракции 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.

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 сезонов. На Рис. 8 представлен пример результатов расчетов структурных функций. Цветовая шкала - величина структурной функции в м^2 .

Оценка сезонных вариаций показала, что наиболее высоких значений временная структурная функция тропосферной задержки в $0,0018 \text{ м}^2$ достигает в летний период измерений. Минимальные значения структурной функции в $0,0003 \text{ м}^2$ показал зимний период.

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.

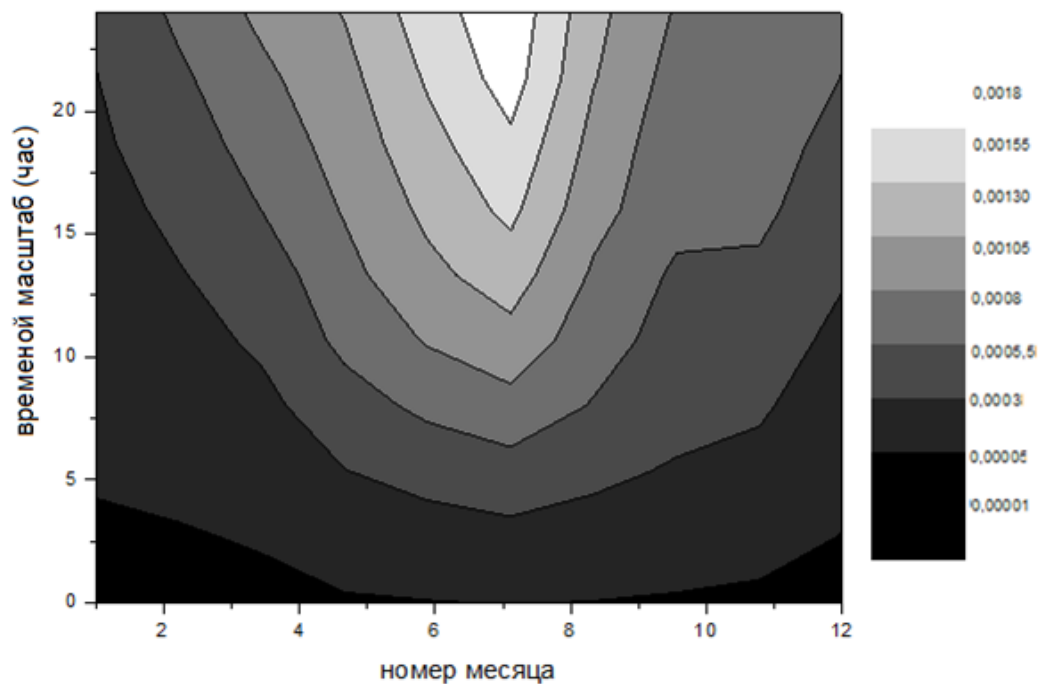


Рис. 8 Сезонный ход значений временной структурной функции зенитной тропосферной задержки в зависимости от временного масштаба 2010 г.

Задача является некорректной, поэтому для решения обратной задачи использовался метод сингулярных разложений. На Рис. 9 представлен пример рассчитанных структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере. Цветовая шкала – отклонение от среднего уровня в N-ед.

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

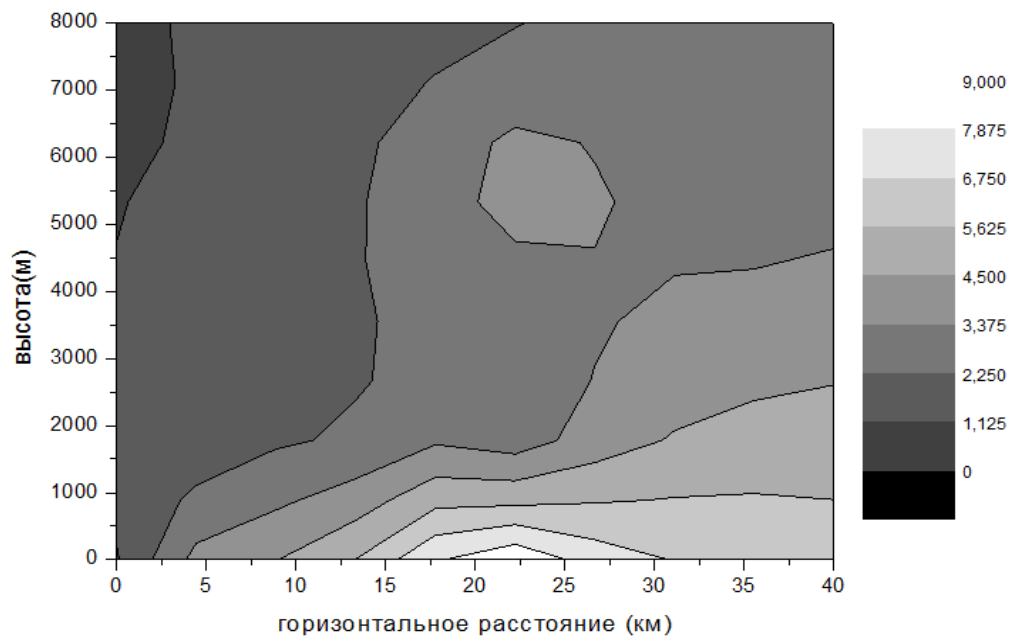


Рис. 9 Вариации значений структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн 0,85 -35 км на различных высотах тропосферы, цветовая шкала выражена в $N\text{-ед}^2$

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Проведен многолетний эксперимент по сбору и анализу синхронных ежесекундных 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 аппроксимации 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.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. **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.53, №1.- С.1-13.
2. **Хуторов, В.Е.** О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS- ГЛОНАСС/ В.Е. Хуторов, А.А. Васильев [и др.] // Оптика атмосферы и океана.- 2010.- Т.23, № 6.- С. 510-514.
3. **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.
4. **Хуторов, В.Е.** О возможности исследования горизонтальных структурных функций коэффициента преломления радиоволн в тропосфере с помощью сети приемных пунктов GPS – ГЛОНАСС/ Хуторов В.Е., Журавлев А.А., Тептин Г.М. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика.- 2012.- Т. 55, № 5.- С. 1-8.
5. **Хуторов, В.Е.** Пассивное зондирование структуры коэффициента преломления радиоволн в тропосфере сетью приёмников спутниковых навигационных систем в г. Казани / В.Е. Хуторов, Г.М. Тептин, А.А. Васильев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. -2011.- Т. 54, № 1. -С. 1-8.

Индексированы в базе SCOPUS

6. **Khutorov, V.E.** Variability of GPS-derived zenith tropospheric delay and some result of its assimilation into numeric atmosphere model / V.E. Khutorov, G.M. Teptin, V.E. Kalinnikov, [at al.] // PIRS Proceedings.-2012. -P.940 - 943,
7. **Khutorov, V.E** Horizontal structural functions in troposphere for radio waves refractivity index by use of ground set of GPS-GLONASS receivers/ V.E. Khutorov, A.A. Juravlev, and G.M. Teptin // PIRS Proceedings. – 2012.- P. 944 – 947.
8. **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 / V.E. Khutorov, A.A. Juravlev, G.M. Teptin // Radiophysics and Quantum Electronics.- 2012.- V. 54, № 1.- P. 1-8.
9. **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. V.E Khutorov, P. Zinin [at al.] // Radiophysics and Quantum Electronics.- 2010.- V. 53, № 1.-P. 1-12.
10. **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 / G.M. Teptin, A.A. Vassilyev, V.E. Khutorov [at al.] //Radiophysics and Quantum Electronics. -2011.- V.54, N1.- P. 1-8.

Прочие публикации:

11. **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 [и др.] // Труды XXII всероссийской конференции «Распространение радиоволн» п.Лоо 22-29 сентября 2008, Изд-во ФГОУ ВПО «Южный федеральный университет» Ростов: -2008.- Т. III.- С.90-93.
12. **Хуторов, В.Е.** Решение задачи восстановления вертикальной и горизонтальной структуры метеопараметров по радиосигналам спутниковых навигационных систем / А.А. Васильев, В.Е. Хуторов // Труды Всероссийской научной конференции «Изменяющаяся окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований». Казань: 2009- Т.2.-С.42-45.
13. **Хуторов, В.Е.** Исследование сезонных и суточных вариаций мезомасштабной структуры тропосферы [Электронный ресурс]: Электрон. версия трудов конференции / - Текстовые дан. Томск. : Изд-во ИОА им. В.Е.Зуева СО РАН, 2013. С. 324-327 – (CD-ROM).
14. **Khutorov, V.E.** About minimal value of structural function for tropospheric radio waves delay // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.-2011, V.17, N2.- P. 24 -27.
15. **Khutorov, V.E.** Estimation of macroturbulence in fluence on the radio waves propagation in the troposphere and ionosphere using GPS-GLONASS// Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2008. -V.14, N2, -P. 20 -23.

16. **Хуторов, В.Е.** Методика применения сети станций спутникового позиционирования для мониторинга состояния атмосферы РТ/ В.Е. Хуторов, А.П. Шлычков, А.А. Васильев [и др.] //Журнал экологии и промышленной безопасности.- 2008.- № 3. С.32-35.
17. **Khutorov, V.E.** Some result of investigations of local by the net of seven GPS-GLONASS receivers / V.E. Khutorov, G.M. Teptin, A.M. Maksimov, [at al.] // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2008. -V.14, N1. -P 17 -22.
18. **Khutorov, V.E.** Investigations of space temporal structure for atmospheric inhomogenities over Tatarstan/ V.E. Khutorov, G.M.Teptin, A.M. Maksimov [at al.]// Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2007, V.13, N3.- P 20 -24.
19. **Хуторов, В.Е.** Использование сети приемников ГЛОНАСС-GPS в региональных системах мониторинга //Журнал экологии и промышленной безопасности.- 2009. -№3. -С.26-29.
20. **Khutorov, V.E.** Macroturbulence influence on radiowaves propagation in the troposphere with use GPS-GLONASS radiosignals // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2008.-V.15, No.1-2.- P 21 -24.
21. **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.19, No.1-2.- P 7 -11.
22. **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.
23. **Хуторов, В.Е.** Исследование тропосферных неоднородностей сетью станций приемников спутниковых навигационных систем / Г.М. Тептин, А.А. Хуторов, Т.Р. Курбангалиев [и др.] // Тез. международного симпозиума "Атмосферная Радиация и Динамика".- С.Пб.- 2009.-С.53.
24. **Хуторов, В.Е.** Исследование структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS- ГЛОНАСС в г. Казани // Тез. XVI группы "Аэрозоли Сибири" Томск.- 2009.- С.31.
25. **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". 11-12 декабря 2009. [Электронный ресурс]/ КГУ.- Зеленодольск-Казань: 2009 – (CD-ROM).
26. **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.
27. **Хуторов, В.Е.** Программно – аппаратный комплекс исследования тропосферы в г. Казани / В.Е. Хуторов, Г.М. Тептин, Д.П. Зинин, [и др.]// Тез. XVII группы "Аэрозоли Сибири" Томск. - 2010.- С.87.
28. **Хуторов, В.Е.** Проявление макротурбулентности в измерениях сети спутникового мониторинга//Сборник тезисов МСАРД-2011 С.-Пб. - 2009.- С.47.
29. **Хуторов, В.Е.** Мониторинг тропосферы аппаратно программным комплексом сети станций приемников спутниковых навигационных систем и численной мезомасштабной модели / А.А. Васильев, В.В. Каллиников, В.Е. Хуторов [и др.] // Сборник тезисов МСАРД-2011 С.-Пб. : 2009.- С.60.
30. **Хуторов, В.Е.** Исследование вертикальной изменчивости неоднородной структуры тропосферы с помощью систем спутниковой навигации // Тез. XVIII группы "Аэрозоли Сибири" Томск. - 2011.- С.85
31. **Хуторов, В.Е.** Временная изменчивость мезомасштабной структуры тропосферы // Тез. XIX Рабочей группы "Аэрозоли Сибири".- Томск.- 2012.- С.48.
32. **Khutorov, V.E.** The Satellite Navigation System applying for the investigation of the mesoscale structure diurnal variations in troposphere // International symposium "Atmospheric radiation and dynamics" Proceedings.- Saint-Petersburg.- 2013.- P.45.
33. **Хуторов В.Е.** Исследование сезонных и суточных вариаций мезомасштабной структуры тропосферы // Тез. XIX Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы".- г. Барнаул.- 2013.- С.123.
34. **Хуторов, В.Е.** Исследование горизонтальных структурных функций индекса рефракции радиоволн в тропосфере / В.Е. Хуторов, А.А. Журавлев, Г.М. Тептин // Сборник тезисов международной конференции "Турбулентность, динамика атмосферы и климата".- Москва.-2013.-С.192.

Список используемой литературы

1. 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.
2. Киселев, О.Н. Мезомасштабные пространственно-временные флуктуации [Текст] //Доклады ТУСУРа.-2010-№ 1 (21), часть 2.
3. Логинов Н.В. Сингулярное разложение матриц. // Москва: МГАПИ.,- 1996.-80 с.

4. Татарский, В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере [Текст] / В. И. Татарский// М. - Наука. - 1967 г. - 548 с.
5. Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F. at al.. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. Rem. Sens. Environ. 2000