

УДК 537.876+551.51

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРНОЙ ФУНКЦИИ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАДИОСИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ В СРАВНЕНИИ С ПАРАМЕТРАМИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ТРОПОСФЕРЫ

В. Е. Хуторов<sup>1</sup>\*, Г. М. Тентин<sup>1,2</sup>, А. А. Журавлёв<sup>1</sup>, О. Г. Хуторова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский Приволжский федеральный университет;

<sup>2</sup> Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского РАН, г. Казань, Россия

В работе представлены результаты четырёхлетнего (2009–2012 годы) экспериментального исследования распространения радиоволн дециметрового диапазона с помощью сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и синхронных измерений параметров приземного слоя тропосферы в г. Казань. Проанализирована межгодовая и внутригодовая изменчивость временных структурных функций зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн. Обнаружено, что вклад неоднородностей с временными масштабами до 24 часов в дисперсию флуктуаций зенитной тропосферной задержки меняется в зависимости от приземных метеопараметров (температуры и давления). Коэффициент корреляции показателей степеней аппроксимаций временной структурной функции зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн и приземной температуры достигает значения 0,77 для флуктуаций с временными масштабами до 8 ч. Установлено влияние синоптических процессов и подстилающей поверхности на формирование мезомасштабных флуктуаций фазового пути радиосигналов спутниковых навигационных систем.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется связи радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с параметрами тропосферы и ионосферы. В США, Японии, Китае, Западной Европе много исследований посвящено дистанционному зондированию тропосферы с использованием ГНСС [1–19]. Показано, что сигналы ГНСС можно эффективно использовать для исследования атмосферных процессов. Во всех этих работах используется один общепризнанный подход, развитый впервые в работе [1].

В основе дистанционного зондирования лежит оценка зенитной тропосферной задержки электромагнитных волн, излучаемых спутником. Оценка этой величины даётся разностью измеренного наземным приёмником фазового пути сигнала, переданного спутником, и геометрического расстояния между спутником и приёмником. Поскольку сигнал распространяется в атмосфере, то разность между фазовым путём и геометрическим расстоянием определяется задержками радиосигнала в тропосфере и ионосфере [3]. Тропосферная задержка при малых углах места радиотрасс спутник–антенна может достигать нескольких десятков метров. При вертикальной трассе (угол места равен 90°) тропосферная задержка минимальна, её значение меняется в пределах 1,9÷2,8 м [3].

С точки зрения влияния на распространение радиоволн тропосферу рассматривают как смесь сухого воздуха и водяных паров. В тропосфере индекс рефракции радиоволн  $N$  зависит от давления  $P$ , температуры  $\tau$  и влажности  $e$  согласно формуле [20]

$$N = \frac{77,8}{\tau[\text{К}]} \left( p[\text{мбар}] + \frac{4810e[\text{мбар}]}{\tau[\text{К}]} \right). \quad (1)$$

\* pri870@yandex.ru

Зенитная тропосферная задержка ZTD представляет собой сумму задержек, вызванных сухими газами и водяными парами [1,2]:

$$\text{ZTD} = \text{ZHD} + \text{ZWD} = A \int \frac{p}{\tau} dh + B \int \frac{e}{\tau^2} dh. \quad (2)$$

Здесь ZHD и ZWD — задержки электромагнитных волн, которые определяются влиянием неполярных газов атмосферы (сухая задержка) и влиянием водяного пара (влажная задержка) соответственно,  $A$  и  $B$  — константы. Интеграл берётся по высоте, начиная от высоты приёмной антенны. Поскольку первое слагаемое определяется интегрированием по высоте плотности сухого воздуха, которая хорошо восстанавливается по её приземным значениям, то сухая задержка вычисляется с высокой точностью при известном атмосферном давлении. Разность величин ZTD и ZHD даёт значение влажной задержки. Интегральное влагосодержание атмосферы прямо пропорционально влажной тропосферной задержке радиоволн, коэффициент пропорциональности зависит от температуры, измеряемой метеостанцией на поверхности Земли [3].

Профили гидростатической части индекса рефракции моделируют по приземным значениям давления и отдельно рассматривают только часть тропосферной задержки дециметровых радиоволн, обусловленную парами воды. Как правило, приёмники ГНСС используют для мониторинга интегрального атмосферного влагосодержания, как в региональном, так и глобальном масштабе, в зависимости от количества и конфигурации используемой сети. Активно развивается методика томографии водяного пара в тропосфере [5–7]. Данные ГНСС-мониторинга могут использоваться в численных моделях прогноза погоды [8, 9].

Большая часть работ посвящена сравнению интегрального влагосодержания, полученного с помощью аэрологических и ГНСС-измерений, для разных географических регионов: Австралии и Антарктиды [11], Швеции [13], Италии [16], США [14], Китая [12], Индии [17]. Найденные стандартные отклонения составляют от 1 до 4 мм осаждённой воды. Аналогичные оценки точности получаются при сравнении ГНСС-оценок и данных радиометров [17, 18].

Дистанционное зондирование тропосферы с помощью наземных ГНСС-наблюдений позволяет определить сезонные вариации интегрального влагосодержания и его суточную изменчивость [11–19]. Суточные амплитуды интегрального влагосодержания в Австралии составляют  $1 \div 2$  мм [11], в Китае 0,7 мм [19], на Балтике от 0,05 мм зимой до 0,32 мм летом [14], в Швейцарии 0,3 мм [15].

В России также развиваются методы дистанционного зондирования тропосферы радиосигналами ГНСС. В работах [21, 22] показано, что зенитная тропосферная задержка дециметровых радиоволн — важная характеристика атмосферных процессов. В работе [23] обнаружено, что пространственный градиент атмосферного влагосодержания влияет на флуктуации принимаемых сигналов спутниковых навигационных систем.

Указанные работы показывают, что в настоящее время достаточно много публикаций по методам исследования тропосферы с использованием ГНСС, но недостаточно работ по изучению мезомасштабных (внутрисуточных) неоднородностей тропосферы, а также их влияния на распространение радиоволн.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [24] показано, что наземная сеть приёмников ГНСС позволяет выявить пространственные мезомасштабные неоднородности индекса рефракции дециметровых радиоволн. В работах [25, 26] исследовалась пространственная горизонтальная структурная функция мезомасштабных неоднородностей тропосферы с масштабами до десятков километров. Результаты этих

исследований позволяют судить о пространственных количественных характеристиках мезомасштабных неоднородностей с внутрисуточными временными масштабами, в том числе об их высотной изменчивости [25].

В работе [27] анализ трёхлетних ежесекундных измерений временной структурной функции тропосферной задержки дециметровых радиоволн, проведённый по радиоизмерениям сигналов мезомасштабной сети приёмников ГНСС, позволил выявить следующие основные закономерности.

1) Обнаружены ярко выраженные сезонные вариации временной структурной функции тропосферной задержки дециметровых радиоволн для трёх лет измерений (2009–2011 годы).

2) Вклад неоднородностей с различным временем жизни существенно зависит от сезона. В весенние и летние месяцы основной вклад во временную структурную функцию вносят процессы с длительностью до 8 ч. В осенние и зимние месяцы атмосферные процессы с различным временем жизни вносят примерно одинаковый вклад в тропосферную задержку дециметровых радиоволн.

Цель данной работы состоит в том, чтобы выявить закономерности сезонной и межгодовой изменчивости мезомасштабных флуктуаций задержки ZTD и приземного индекса рефракции дециметровых радиоволн. Для исследования количественной связи изменчивости метеоусловий и фазовых флуктуаций дециметровых радиоволн в тропосфере принято решение о проведении с 2012 года синхронных ежесекундных измерений сигналов ГНСС и основных параметров приземной тропосферы, которые влияют на распространение дециметровых радиоволн (давление, влажность и температура воздуха). Измерение этих параметров проводилось с использованием аппаратуры «Davis Vantage Pro 2» в пяти пунктах, где располагались приёмные станции радиосигналов ГНСС, в непосредственной близости от антенн.

Как и в работе [27], в данной работе применяется метод временных структурных функций для исследования флуктуаций тропосферной задержки радиоволн по ГНСС-измерениям, проведённым в Казани. Рассмотрим применение метода временной структурной функции, подробное описание которого дано в работе [27], при синхронном измерении и анализе радиосигналов ГНСС и параметров приземной атмосферы в приёмных пунктах.

## 2. ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ ФУНКЦИЯ ЗЕНИТНОЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАДИОСИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Величиной, характеризующей состояние тропосферы при её дистанционном зондировании с помощью спутниковых систем, является зенитная тропосферная задержка радиосигналов спутниковых навигационных систем, равная разности оптического и геометрического пути сигнала спутниковых навигационных систем в нейтральной атмосфере в зенитном направлении и измеряемая в единицах длины [3, 22]. Её рассчитывают по измерениям фазового пути радиосигналов от каждого спутника до каждой антенны приёмной сети, накопленным за 5 мин. Мы использовали для расчётов двухчастотные измерения, что существенно сокращает затраты на используемое оборудование и при этом позволяет исключить вклад ионосферы в фазовые измерения сигналов [3, 20]. Истинное расстояние от спутника до антенны исключается с помощью точных эфемерид, полученных с сайта Международной службы ГНСС [28]. 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 [20]. Полученная тропосферная задержка дециметровых радиоволн зависит от индекса их рефракции [20]. По данным ежесекундных измерений фаз радиосигналов ГНСС за период 01.01.2012–31.12.2012 были рассчитаны значения задержки ZTD дециметровых радиоволн, с вре-

менным интервалом 5 мин [22, 25]. Эти ряды использовались для расчёта временных структурных функций ZTD.

Оценка проводилась с помощью временной структурной функции  $D(\Delta t)$ , вычисленной следующим образом:

$$D(\Delta t) = \langle [ZTD(t + \Delta t) - ZTD(t)]^2 \rangle. \quad (3)$$

Для интервала  $\Delta t$ , в соответствии с работой [22], брались значения от 1 до 24 ч. Угловые скобки означают усреднение по выборке для каждого  $\Delta t$  [22]. Необходимо отметить, что временная структурная функция позволяет количественно оценить, насколько различные неоднородности реальной атмосферы влияют на дисперсию динамики атмосферной задержки радиосигналов ГНСС [29].

### 3. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ТРОПОСФЕРЫ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН

В работе проводилась оценка вклада тропосферных неоднородностей в задержку радиосигналов ГНСС для различных сезонов. По данным измерений тропосферной задержки дециметровых радиоволн рассчитывалась временная структурная функция для различных сезонов 2012 года. Для этого использовались данные о тропосферной задержке радиосигналов ГНСС за месячный период измерений для всех месяцев года и для всех 5-ти пунктов мезомасштабной сети в Казани и её окрестностей. Структурная функция рассчитывалась согласно выражению (3), для  $\Delta t$  использовались значения от 1 до 24 ч. На рис. 1а представлены результаты наших оценок структурной функции величины ZTD, по которым можно судить о сезонной изменчивости мезомасштабных атмосферных вариаций. Величина структурной функции показывает вклад процесса с соответствующим значением  $\Delta t$  в задержку ZTD.

Видно, что структурная функция растёт с увеличением временного масштаба в каждый сезон 2012 года. Это показывает, что в атмосфере в среднем за сезон имеются тропосферные неоднородности всех исследуемых временных и пространственных масштабов и каждая из них вносит свой вклад в дисперсию величины ZTD.

Как было отмечено в работе [27], существует заметная сезонная зависимость вклада неоднородностей тропосферы с различными временными масштабами в дисперсию задержки дециметровых радиоволн. Результаты оценки показывают, что по измерениям 2010 года наиболее высоких значений временная структурная функция тропосферной задержки радиоволн достигает в летний период (18 см<sup>2</sup>), минимальные значения отмечаются в зимний период (3 см<sup>2</sup>). Данные измерений в 2012 году говорят о том, что наиболее высоких значений временная структурная функция тропосферной задержки радиоволн также достигает в летний период (5,5 см<sup>2</sup>), минимальные значения отмечаются в осенний период (1,5 см<sup>2</sup>). Эти цифры показывают как сезонные, так и межгодовые вариации структурной функции величины ZTD.

Отметим, что на приведённых на рис. 1а графиках можно выделить три области, в которых структурная функция имеет различный вид. Для каждой из этих областей были рассчитаны степенные аппроксимирующие функции. Показатель степени позволяет судить о вкладе процессов с характерным временем жизни  $\Delta t$  в тропосферную задержку. В табл. 1 представлены численные значения показателя степени аппроксимирующих функций для различных сезонов.

Из данных табл. 1 видно, что в зимние и осенние месяцы атмосферные процессы с различным временем жизни вносят практически одинаковый вклад в дисперсию тропосферной задержки радиоволн, причём показатель степени аппроксимирующей функции зимой в основном меньше,

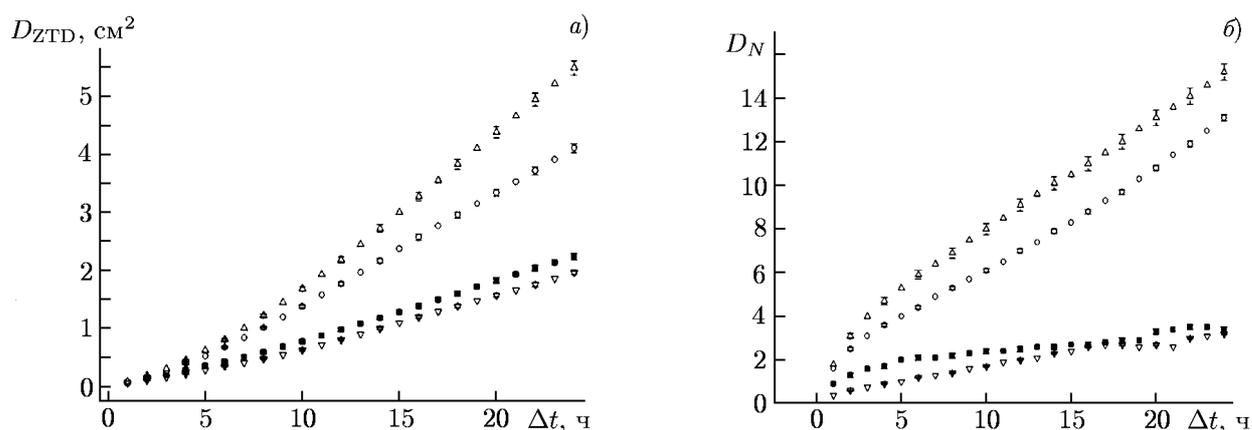


Рис. 1. Структурная функция (с учётом погрешности) зенитной тропосферной задержки  $D_{ZTD}$  (а) и индекса рефракции  $D_N$  (б). Символы ■ соответствуют зимним месяцам, ○ — весенним, Δ — летним, ▽ — осенним

Таблица 1. Показатель степени  $b$  аппроксимации временных структурных функций зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн для различных месяцев 2012 года

месяц	$b (\Delta t = 1 \div 8 \text{ ч})$	$b (\Delta t = 8 \div 16 \text{ ч})$	$b (\Delta t = 16 \div 24 \text{ ч})$
январь	$0,96 \pm 0,01$	$1,01 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,02$
февраль	$0,85 \pm 0,02$	$0,87 \pm 0,01$	$0,67 \pm 0,01$
март	$0,85 \pm 0,02$	$1,15 \pm 0,01$	$1,09 \pm 0,01$
апрель	$1,31 \pm 0,02$	$1,09 \pm 0,01$	$0,91 \pm 0,01$
май	$1,05 \pm 0,01$	$1,29 \pm 0,03$	$1,36 \pm 0,01$
июнь	$1,42 \pm 0,02$	$1,39 \pm 0,01$	$1,05 \pm 0,01$
июль	$1,47 \pm 0,02$	$1,39 \pm 0,01$	$1,08 \pm 0,01$
август	$1,46 \pm 0,03$	$1,49 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,01$
сентябрь	$1,49 \pm 0,01$	$1,45 \pm 0,01$	$1,24 \pm 0,02$
октябрь	$1,11 \pm 0,01$	$1,26 \pm 0,01$	$1,09 \pm 0,02$
ноябрь	$1,19 \pm 0,02$	$1,35 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,01$
декабрь	$0,90 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,02$	$0,89 \pm 0,02$

чем летом. В летние и весенние месяцы основной вклад вносят процессы с длительностью до 16 ч, но для всех  $\Delta t$  соответствующий показатель степени существенно больше, чем зимой. Это может быть связано с тем, что летом и весной атмосфера заметно более неустойчива, там развиваются неоднородности различных масштабов, причём крупные неоднородности легко разрушаются и передают свою энергию более мелким (с более коротким временем жизни) [30].

Поскольку в 2012 году мы синхронно (ежесекундно) измеряли давление, температуру и влажность приземной атмосферы в пунктах расположения антенн на той же высоте, то, подставляя ряды полученных значений в формулу (1), мы получаем синхронный ряд индекса рефракции дециметровых радиоволн в приземном слое атмосферы. Временное разрешение ряда выбрано равным 5 мин для полного соответствия ряду ZTD. По этим данным, аналогично формуле (3), были вычислены временные структурные функции индекса рефракции дециметровых радиоволн, результаты представлены на рис. 1б. Видно, что сезонное поведение структурных функций величин

ны ZTD и приземного индекса рефракции радиоволн подобно. Это подтверждается количественно, т. к. за исследуемый период минимальное отклонение показателей степеней аппроксимаций структурных функций величин ZTD и  $N$  наблюдается зимой и составляет 10%, максимальное отклонение в 13% наблюдается летом.

Это можно объяснить тем, что приземной слой играет основную роль в формировании флуктуаций тропосферной задержки. Во-первых, флуктуации индекса рефракции дециметровых радиоволн в приземном слое имеют наибольшую величину в силу максимальности плотности атмосферы в нём, а более высокие слои оказывают меньшее воздействие на величину ZTD [20]. Во-вторых, в формировании неоднородностей индекса рефракции существенную роль играет подстилающая поверхность [31] в силу неоднородности её нагрева и испарения влаги, что, соответственно, увеличивает дисперсию как мезомасштабных вариаций индекса рефракции радиоволн в приземном слое, так и тропосферной задержки радиоволн [30].

Такая сезонная зависимость соответствует как результатам численного моделирования [32], так и томографическим исследованиям пространственной структуры индекса рефракции радиоволн [33], которые показывают максимальное значение 49 в летний сезон и минимум 18 в зимний. Величина структурной функции тропосферной задержки соответствует по порядку и близка по значению полученной в работе [26]. Сезонное поведение интегрального влагосодержания с максимумами в летний период, установленное в работах [14–19], также подтверждает наши результаты.

#### 4. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН

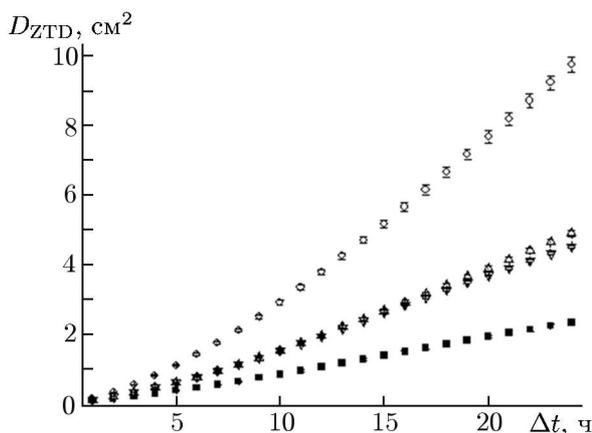


Рис. 2. Среднегодовые значения усреднённой временной структурной функции величины ZTD радиосигналов ГНСС в зависимости от временного масштаба неоднородности за 2009 (■), 2010 (○), 2011 (△) и 2012 (▽) годы

что среднегодовая интенсивность мезомасштабных флуктуаций тропосферной задержки дециметровых радиоволн может отличаться в 2÷3 раза.

Поскольку межгодовые и внутрисезонные вариации флуктуаций тропосферной задержки дециметровых радиоволн, по всей видимости, определяются характерными атмосферными процессами, преобладающими в тот или иной год, было решено исследовать внутрисезонную изменчивость флуктуаций тропосферной задержки.

Полученные результаты соответствуют сезонным вариациям временных структурных функций тропосферной задержки, полученным в работе [27] по наблюдениям 2010 года, но численные значения как самих структурных функций, так и их степенных аппроксимаций отличаются. Например, в 2010 году значения временной структурной функции тропосферной задержки, полученные для летнего периода, в 2÷3 раза превышают значения, полученные по наблюдениям 2012 года. Показатели степеней аппроксимаций также различаются в отдельные месяцы на 20÷30%. Налицо сильные внутригодовые вариации интенсивности мезомасштабных процессов в атмосфере, которые проявляются даже при усреднении за целый год. Межгодовые вариации временной структурной функции тропосферных задержек дециметровых радиоволн за 2009, 2010, 2011 и 2012 годы представлены на рис. 2. Видно,

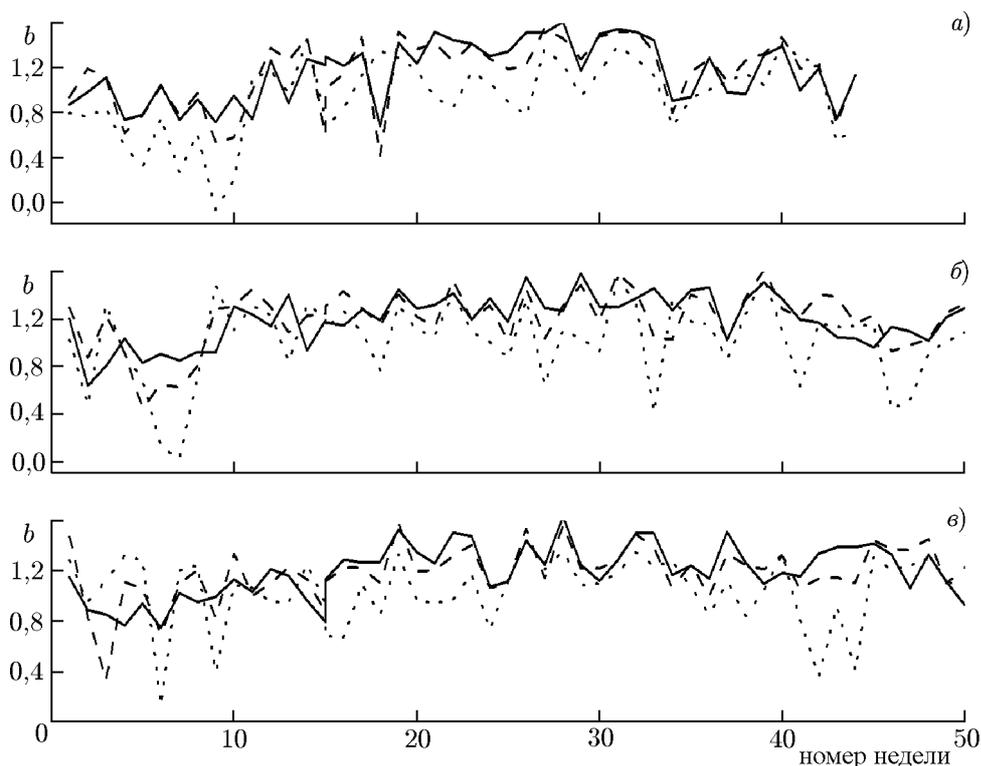


Рис. 3. Изменчивость показателя степени аппроксимации структурных функций величины ZTD дециметровых радиоволн по измерениям приёмников ГНСС в 2012 (а), 2011 (б) и 2010 (в) годах. Сплошные линии соответствуют  $\Delta t = 1 \div 8$  ч, штриховые  $\Delta t = 9 \div 16$  ч, пунктирные  $\Delta t = 17 \div 24$  ч

### 5. ВНУТРИСЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФЛУКТУАЦИЙ ЗЕНИТНОЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН

На основе данных мониторинга за каждую неделю в течение 2009–2012 годов были рассчитаны временные структурные функции величины ZTD. Значения структурной функции для каждой недели были разделены на три области временных масштабов, в каждой из которых были рассчитаны степенные аппроксимирующие функции. Ежедневные вариации показателя степени аппроксимирующей функции представлены на рис. 3. Кроме годового и межсезонного тренда можем отметить существенные внутрисезонные вариации, значимые с вероятностью 95%. Временной масштаб изменчивости соответствует атмосферным процессам синоптического масштаба [30]. Наблюдается корреляция показателей степеней аппроксимаций структурных функций величины ZTD для неоднородностей с масштабами  $1 \div 8$  ч и  $9 \div 16$  ч (коэффициент корреляции 0,73). Корреляция показателей степеней аппроксимаций структурных функций величины тропосферной задержки для неоднородностей с масштабами  $1 \div 8$  ч и  $17 \div 24$  ч имеется, но выражена она слабее (коэффициент корреляции трёхлетних временных рядов равен 0,4).

Мы провели сравнение временных рядов полученных показателей степеней аппроксимаций структурных функций тропосферной задержки в 2012 году с изменчивостью метеопараметров приземного слоя. Обнаружено, что коэффициент корреляции временного ряда показателя степени аппроксимации структурных функций и временного ряда температуры в приземном слое тропосферы уменьшается с ростом масштаба неоднородностей: для неоднородностей с масштабами  $1 \div 8$  ч он равен 0,77, для неоднородностей с масштабами  $9 \div 16$  ч он составляет 0,60, а для масштабов  $17 \div 24$  ч он равен 0,40.

Таблица 2. Показатели степени аппроксимаций временных структурных функций зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн для различных значений приземного давления

$\Delta t$ , ч	$b$ ( $P < 756$ мм. рт. ст.)	$b$ ( $P > 756$ мм. рт. ст.)
1÷8	$1,27 \pm 0,05$	$1,09 \pm 0,08$
8÷16	$1,3 \pm 0,05$	$1,10 \pm 0,10$
16÷24	$1,15 \pm 0,06$	$0,86 \pm 0,12$

нелинейная, т. к. коэффициент корреляции составляет  $0,5 \div 0,6$ ) связь изменчивости показателя степени аппроксимации структурных функций и атмосферного давления в приземном слое (см. табл. 2). Наиболее сильно (на 33 %) показатель степени меняется в диапазоне 17÷24 ч. Это означает, что синоптические вариации давления приводят к кратной (до 2÷3 раз) изменчивости фазовых флуктуаций дециметровых радиоволн на тропосферных трассах, причём эти флуктуации будут обусловлены долгопериодными мезомасштабными процессами.

Такие результаты можно объяснить тем, что неоднородности, особенно с масштабами от 1 до 8 ч, связаны с развитием конвекции. Конвективные ячейки развиваются с увеличением приземной температуры, выносят с поверхности Земли водяной пар и, соответственно, увеличивают флуктуации фазы сигналов ГНСС. Процессы большего временного масштаба меньше связаны собственно с конвекцией, однако неоднородности величины ZTD с масштабами от 8 до 24 ч должны усиливаться при увеличении нагрева подстилающей поверхности [30]. Связь с полем давления может быть обусловлена тем, что повышенное давление часто наблюдается в антициклонах, атмосфера при этом находится в устойчивом состоянии, неоднородности развиваются слабее, и, соответственно, слабо влияют на фазовые флуктуации дециметровых радиоволн. Напротив, пониженное атмосферное давление (например, в циклоне) обычно связано с вертикальным переносом влаги при неустойчивой атмосферной стратификации [29]. Полученные результаты позволяют предположить наличие сильного влияния подстилающей поверхности на формирование мезомасштабных флуктуаций фазового пути радиосигналов спутниковых навигационных систем, что показано также в работах [31, 32].

Структурные функции тропосферной задержки и их изменчивость позволяют предположить, что атмосферная рефракция вызывает существенные флуктуации фазы дециметровых радиоволн на наклонных трассах, т. к. исследованные временные флуктуации определяются неоднородностями с пространственными масштабами от 2 до 100 км [30, 32], что ограничивает возможности радарной интерферометрии и других высокоточных радиоизмерений. При длине волны 19 см флуктуации фазы радиоволн на трассах с углом места  $10^\circ$  могут достигать полутора циклов в летний период, а в зимний — до полуцикла. Принимая во внимание широтные зависимости сезонных вариаций интегрального влагосодержания атмосферы, установленные в работах [14–19], можно предположить, что фазовые флуктуации дециметровых радиоволн на наклонных трассах будут сравнимы с полученными в данной работе в средних широтах Земли, будут усиливаться в тропическом климате, но конкретные эмпирические модели можно будет построить после дополнительных исследований.

В работе [34] показано, что разница фазовых измерений, вызванная вариациями тропосферной задержки, наиболее существенно влияет на вычисление разности высотных координат между антеннами. Таким образом, полученные результаты по изменчивости флуктуаций величины ZTD

даётся величиной 0,49. Это означает, что внутригодовая изменчивость температуры, вызванная синоптическими процессами, приводит к кратному (до 3÷5 раз) увеличению фазовых флуктуаций радиосигналов, распространяющихся в тропосфере, и в основном эти флуктуации будут обусловлены короткопериодными мезомасштабными процессами. В то же время наблюдается некоторая (явно

показали, что точность оценки высоты при дифференциальных геодезических измерениях с помощью приемников ГНСС будет существенно зависеть от синоптических процессов в приземном слое атмосферы.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным годового цикла (2012 год) синхронных наблюдений сигналов ГНСС и метеопараметров показано подобие структурных функций зенитной тропосферной задержки и коэффициента преломления дециметровых радиоволн (показатели степени соответствующих аппроксимирующих функций отличаются на  $10 \div 13\%$ ). Этот факт позволяет предположить, что определяющую роль в формировании фазовых флуктуаций величины ZTD играет приземной слой атмосферы. По циклу наблюдений 2009–2012 годов обнаружена сильная сезонная и межгодовая изменчивость мезомасштабных флуктуаций зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн. Временная структурная функция тропосферной задержки радиоволн достигает максимума в летний период ( $5,5 \div 18 \text{ см}^2$ ), минимальные её значения отмечаются в зимний период ( $1,5 \div 3,0 \text{ см}^2$ ).

Показано, что вклад неоднородностей с масштабами до 24 ч в дисперсию флуктуаций зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн меняется в зависимости от приземных метеопараметров (температуры и давления). Коэффициент корреляции, полученный для показателей степеней аппроксимаций структурных функций величины ZTD в 2012 году и временного ряда температуры уменьшается с ростом масштаба неоднородностей: для неоднородностей с масштабами  $1 \div 8$  ч он равен 0,77, для неоднородностей с масштабами  $8 \div 16$  ч он составляет 0,60, для масштабов  $16 \div 24$  ч он даётся величиной 0,49. Обнаружен более быстрый рост мезомасштабных флуктуаций с понижением атмосферного давления. Связь изменчивости параметров временной структурной функции зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн с вариациями приземных температуры и давления свидетельствует о сильном влиянии синоптических процессов и подстилающей поверхности на формирование мезомасштабных флуктуаций фазового пути дециметровых радиоволн в тропосфере.

Работа выполнена за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bevis M. S., Businger T. A. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, No. D14. P. 15 787.
2. Basili P., Bonafoni S., Felra R. // IEEE. Proc. Microw. Antennas Propag. 2000. V. 147, No. 1. P. 3078.
3. Guochang X. GPS. Theory, Algorithms and Applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
4. Flores A., de Arellano J. V-G., Gradinarsky L. P., Rius A. // Trans. Geosci. Remote Sensing. 2001. V. 39, No. 2. P. 439.
5. Flores A., Ruffini G., Rius A. // Ann. Geophys. 2000. V. 18, No. 2. P. 223.
6. Bastin S., Champollion C., Bock O. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32, No. L05. P. 808.
7. Davies O. T., Mitchell C. N., Spenser P. S. J., Watsons P. A. // Int. Conf. Antennas Propag. 2001. No. 480. P. 288.
8. Boniface K., Ducrocq V., Jaubert G., et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 2 739.
9. Faccani C., Ferretti R. P. // Adv. Geosci. 2005. V. 2. P. 73.

10. Ware R. H., Fulker D. W., Stein S. A. // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2001. V. 63, No. 12. P. 1315.
11. Glowacki J., Penna N. T. // *Aust. Meteorol. Mag.* 2006. V. 55. P. 131.
12. Guoping L., Dingfa H., Biquan L. // *Geo-spatial Information Sci.* 2007. V. 10. P. 181.
13. Ning T., Haas R., Elgered G., Willén U. // *J. Geodesy.* 2012. V. 7, No. 86. P. 565.
14. Jakobson E., Ohvril H., Elgered G. // *Boreal Env. Res.* 2009. V. 14. P. 45.
15. Morland J., Collaud C. M., Hocke K. // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 5975.
16. Pacione R., Fionda E., Ferrara R. // *Phys. Chem. Earth.* 2002. V. 27. P. 309.
17. Raju S., Saha K., Bijoy V. T. // *Proc. URSI General Assembly 23–29 October, 2005, New Delhi, India.* P.20.
18. Sapucci L., Machado L., Monico J. // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2007. V. 24. P. 1880.
19. Shuanggen J., Li Z., Choa J. // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2008. V. 47. P. 3008.
20. Яковлев О.И. *Космическая радиофизика.* М.: Научная книга, 1998. 432 с.
21. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б. // *Изв. вузов. Физика.* 2013. Т. 56, № 10-3. С. 70.
22. Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. // *Изв. РАН. ФАО.* 2012. Т. 48, № 6. С. 631.
23. Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2013. Т. 56, № 2. С. 62.
24. Хуторова О.Г., Тептин Г.М., Васильев А.А. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2011. Т. 54, № 1. С. 1.
25. Хуторов В.Е., Журавлёв А.А., Тептин Г.М. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2012. Т. 55, № 5. С. 1.
26. Vennebusch M., Schon S., Weinbach U. // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47. P. 1681.
27. Хуторов В.Е., Тептин Г.М. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2014. Т. 57, № 6. С. 484.
28. International GNSS Service: <http://igsb.jpl.nasa.gov/>
29. Татарский В.И. *Распространение волн в турбулентной атмосфере.* М: Наука, 1967. 548 с.
30. Шакина Н.П. *Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере.* Л.: Гидрометеоздат. 1990. 308 с.
31. Хуторова О.Г., Тептин Г.М., Хуторов В.Е. // *Опт. атмосферы и океана.* 2014. Т. 27, № 6. С. 520.
32. Тептин Г.М., Хуторова О.Г., Зинин Д.П., Хуторов В.Е. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 1. С. 1.
33. Низамеев А.Р., Тептин Г.М. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2013. Т. 56, № 6. С. 4.
34. Santerre R. *GPS satellite sky distribution: impact on the propagation of some important errors in precise relative positioning.* Brunswick: UNB, 1989. 203 p.

Поступила в редакцию 25 мая 2015 г.; принята в печать 11 мая 2016 г.

## VARIABILITY OF THE TROPOSPHERIC DELAY TEMPORAL STRUCTURE FUNCTION OF RADIO SIGNALS OF THE GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS VERSUS TROPOSPHERIC SURFACE LAYER PARAMETERS

*V. E. Khutorov, G. M. Teptin, A. A. Zhuravlev, and O. G. Khutorova*

We present the results of a four-year (2009–2012) study of the decimeter radio wave propagation of the global navigation satellite system (GLONASS) signals and simultaneous measurements of the tropospheric surface layer parameters in the city of Kazan. Inter- and intra-annual variabilities of the temporal structure functions of the zenith tropospheric delay (ZTD) of decimeter radio waves are analyzed. It has been found that the contribution of irregularities with time scales of up to 24 h to

the ZTD fluctuation variance varies, depending on the surface weather parameters (temperature and pressure). Correlation coefficient between the approximation exponents of the ZTD temporal structure function of decimeter radio waves and surface temperature reaches 0.77 for fluctuations with time scales of up to 8 h. It has been established that synoptic processes and the underlying surface affect the formation of mesoscale fluctuations on the phase path of radio signals of the navigation satellite systems.