

УДК 537.876:551.51

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ СЕТИ ПРИЁМНЫХ ПУНКТОВ GPS И ГЛОНАСС

В. Е. Хуторов¹, А. А. Журавлёв¹, Г. М. Тептин^{1,2}

¹ Казанский федеральный университет;

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

В работе представлены результаты экспериментального исследования горизонтальных структурных функций тропосферной задержки радиоволн, а также высотные вариации ($0 \div 10$ км) структурной функции индекса рефракции радиоволн, рассчитанные по данным сети приёмников спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, разнесённых на расстояния от 1 до 35 километров.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с развитием технологии спутниковых навигационных систем появилась возможность использовать их сигналы для дистанционного зондирования тропосферы и таким образом оценивать влияние неоднородностей индекса рефракции и коэффициента преломления в тропосфере на распространение дециметровых радиоволн. Это связано со следующими преимуществами данной технологии: наличием плотной сети наземных станций постоянного слежения, круглосуточной записью измерений с высоким временным разрешением, отсутствием зависимости от погодных условий.

В работе [1] приведены высотные вариации индекса рефракции радиоволн, полученные по измерениям на специализированной сети приёмников спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, и их проверка по прямым радиозондовым измерениям. Однако сеть приёмных станций в г. Казань позволяет также исследовать количественные характеристики горизонтальных неоднородностей, например, структурные функции [2] индекса рефракции радиоволн, в зависимости от высоты. Данная статья посвящена изложению основных результатов измерений горизонтальных структурных функций индекса рефракции радиоволн в зависимости от высоты от поверхности Земли в интервале до 10 км.

Исследование неоднородностей и их переноса, связанного с движением воздушных масс в атмосфере, является одной из важнейших современных научных задач. В частности, пока слабо исследован вклад неоднородностей в ошибки радиотехнических измерений при спутниковой навигации. Существенный вклад могут внести неоднородности с горизонтальными пространственными масштабами от нескольких метров до десятков километров, что показано в работе [3] с помощью численного моделирования. Экспериментальных исследований таких процессов в тропосфере (за исключением приземного слоя) проводилось мало в силу высоких требований к временному и пространственному (в том числе по высоте) разрешению. Такой эксперимент проводился в г. Казань с использованием сети приёмных станций спутниковых навигационных систем [1]. В результате накоплена уникальная база данных многолетних измерений (2007–2011 годы) с высокой частотой в единицу времени, которая позволила не только обнаружить, но и получить количественные характеристики структуры неоднородностей коэффициента преломления дециметровых радиоволн в тропосфере.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Поскольку на трассе между спутником и приёмником радиоволны испытывают влияние атмосферы, то радиосигнал приходит на приёмник с некоторой задержкой [4]. Измерив её пространственные и временные вариации, можно определить количественные характеристики атмосферных процессов.

Расстояние до спутника, измеренное приёмником по фазе несущей, можно представить в виде суммы истинного расстояния между спутником и приёмником, ионосферной и тропосферной задержек радиосигнала, а также ошибки измерения, в том числе ошибки за счёт ухода часов приёмника и спутника. Атмосферная поправка, характеризующая запаздывание радиоволн по сравнению с распространением в вакууме, определяется как интеграл от коэффициента преломления по пути, пройденному радиоволной в атмосфере [5]:

$$\Delta L_i^j = 10^{-6} \int_S n(s) ds. \quad (1)$$

Интеграл взят по линии радиотрассы от спутника до антенны. Здесь n — коэффициент преломления радиоволн, i — номер спутника, j — номер антенны. Это основная характеристика атмосферы как среды распространения радиоволн.

Ключевым параметром дистанционного зондирования тропосферы является зенитная тропосферная задержка радиосигналов спутниковых навигационных систем (ZTD), равная разности оптического и геометрического путей сигнала спутниковых навигационных систем в нейтральной атмосфере в зенитном направлении, измеряемой в единицах длины. Её оценивают из уравнений, которые строят по измерениям фазового пути радиосигналов от каждого спутника до каждой антенны приёмной сети:

$$L_i^j - S_j^i = T_j^i - I_j^i + c dt + M_j^i + \varepsilon, \quad (2)$$

где T — наклонная задержка радиосигналов в тропосфере, т. е. задержка радиосигнала в тропосфере при распространении от спутника до приёмника, I — задержка радиосигналов в ионосфере, c — скорость света, dt — разность временных шкал часов спутника и приёмника, M — фазовая неоднозначность, ε — шум измерений. Для удаления ошибки из-за несинхронности хода часов формируются разности измерений, сделанных одновременно на двух наземных приёмниках для трасс одних и тех же спутников [3]. Для исключения ионосферного воздействия на длину фазового пути используются двухчастотные измерения, позволяющие составлять свободные от влияния ионосферы комбинации [6]. При этом наклонные тропосферные задержки сигналов, принятых от спутников с различными углами места, представляются в виде произведения зенитной тропосферной задержки, общей для всех синхронных наблюдений с одного приёмника, на некоторую картирующую функцию m , зависящую от зенитного угла спутника z [3]:

$$T = \text{ZTD } m(z). \quad (3)$$

Решением составленных уравнений для свободных от влияния ионосферы комбинаций являются разности ZTD для двух пунктов, в которых расположены приёмники.

В практике исследований влияния неоднородностей на распространение радиоволн наиболее широко используются два метода — спектральный и метод структурных функций [2, 7, 8]. При измерении спектров надо учитывать, что в измеряемый сигнал входит суперпозиция влияния неоднородностей абсолютно всех масштабов, а при использовании структурных функций в измеряемом сигнале не учитывается влияние неоднородностей с размерами меньше некоторой величины [2, 8]. Для радиотрасс спутник—наземный приёмник наиболее пригоден второй метод — структурных функций.

Мы строим структурную функцию зенитных тропосферных задержек сигналов спутниковых навигационных систем и индекса рефракции N для дециметровых радиоволн в зависимости от горизонтального расстояния r между приёмными станциями сети GPS и ГЛОНАСС:

$$D_n(r) = \langle [N(0) - N(r)]^2 \rangle, \quad D_q(r) = \langle [\text{ZTD}(0) - \text{ZTD}(r)]^2 \rangle. \quad (4)$$

Первый член в скобках соответствует опорному приёмному пункту с условной координатой (0), а второй — точке на расстоянии r от опорного пункта. Угловые скобки обозначают усреднение по времени. Физический смысл структурной функции есть среднее квадрата флуктуаций исследуемой величины в области соответствующих пространственных масштабов в процессах со стационарным приращением [2, 7, 8].

В каждой точке радиотрассы спутник—наземный приёмник коэффициент преломления n можно разделить на два слагаемых [3, 5]: некоторую среднюю величину, плавно зависящую от времени и координат, и быстро меняющуюся, определяемую атмосферными неоднородностями [9]. Поскольку характерное время жизни турбулентных процессов — несколько секунд [2], то, усредняя измерения за 5–30 минут, мы исключаем быстрые процессы с малыми пространственными масштабами. В работе [10] показано, что влияние ионосферных неоднородностей на структурные функции тропосферных задержек пренебрежимо мало.

Если при измерении структурной функции индекса рефракции радиоволн в двух приёмных пунктах сети ГЛОНАСС и GPS брать синхронизированные по времени пары радиотрасс спутник—наземный пункт, то из-за одинакового влияния погрешностей, вносимых оборудованием спутника при синхронном приёме в двух наземных точках, мы получим структурную функцию, обусловленную неоднородностями, плюс погрешности, вносимые при измерениях двумя приёмниками [5].

Структурные функции индекса рефракции дециметровых радиоволн строятся после решения обратной задачи восстановления вертикального профиля. Как показано в [1], вертикальные профили индекса рефракции совпадают с аналогичными, полученными по радиозондовым наблюдениям, со среднеквадратическим отклонением около 2 % относительно среднего значения индекса рефракции. В данной работе мы вместо метода Тихонова использовали метод сингулярных разложений [11]. Проверка полученных профилей по радиозондовым данным показала аналогичную по величине точность.

Для построения структурных функций использовались оценки разности зенитной тропосферной задержки и индекса рефракции радиоволн в двух пространственно разнесённых пунктах, полученные за 10 с, которые усреднялись за период не менее 1 часа.

Для оценки погрешности вышеописанной методики ставился специальный эксперимент. Мы оценивали дисперсию разности ZTD при горизонтальном расстоянии между приёмными антеннами от 12 до 26 м. При таком размере базы крупные неоднородности не будут влиять на оценки, а усреднением за час исключается влияние мелкомасштабных неоднородностей. Такой подход позволил оценить точность нашего метода. Проведя измерения структурной функции тропосферной задержки по малой базе, мы определили, что точность измерения структурной функции равна $0,002 \text{ м}^2$. Оценки структурной функции индекса рефракции также показали малую изменчивость (в пределах ошибки измерения) на расстоянии до 100 м. Этот факт показывает, что метод чувствителен только к неоднородностям с масштабами в несколько сотен метров и более, т. е. к мезомасштабным неоднородностям. Структурная функция при наличии атмосферных горизонтальных неоднородностей должна, как правило, расти с увеличением r [2, 8]. Закон изменения структурных пространственных функций зависит от размера неоднородностей в атмосфере и, как правило, описывается степенной зависимостью [7].

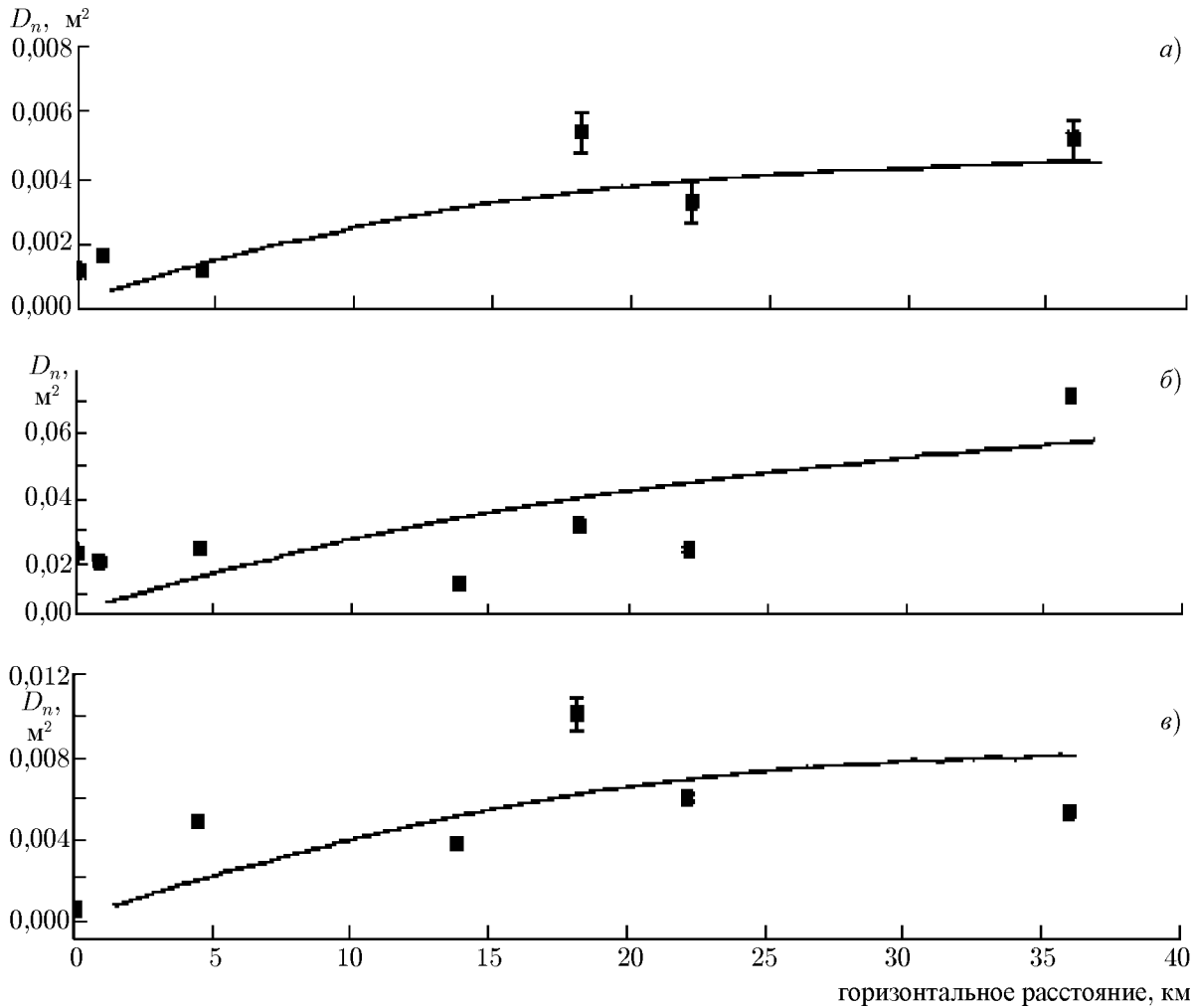


Рис. 1. Структурные функции зенитных тропосферных задержек радиосигналов, измеренных 23 августа 2009 года на сети приёмных пунктов спутниковых навигационных систем в интервале масштабов $0,85 \div 35$ км, для различного времени суток и их аппроксимации степенной функцией. Панель (а) соответствует временному интервалу 03:00–04:00 LT, (б) — 12:00–13:00 LT, (в) — 21:00–22:00 LT

Для оценки влияния суточной динамики мезомасштабных неоднородностей на тропосферные задержки радиосигналов спутниковых навигационных систем был поставлен эксперимент на сети приёмников, разнесённых на расстояния от 1 до 35 км. В качестве примера на рис. 1 приведены графики типичных структурных функций тропосферных задержек, построенных по данным измерений в течение одних суток по описанной выше методике для 23 августа 2009 года. На рис. 1 представлены структурные функции и их доверительные интервалы для 03:00, 12:00 и 21:00 LT. Доверительные интервалы значительно больше, чем точность измерения структурных функций, и определяются временными вариациями структурных функций.

Как и ожидалось, структурные функции растут по мере увеличения расстояния между пунктами измерений, т. е. вклад неоднородностей в тропосферную задержку растёт с увеличением размеров неоднородностей. Видно, что в области масштабов $1 \div 35$ км структурная функция значительно меняется в зависимости от времени суток. Для базы в $21 \div 35$ км в дневные часы её величина достигает значений $0,06 \div 0,07 \text{ м}^2$, утром и вечером — $0,007 \text{ м}^2$. Такое поведение структурной функции означает, что в дневные часы увеличивается дисперсия индекса рефракции радиоволн в горизонтальном направлении в области масштабов порядка десятков километров. Такое пове-

дение наблюдалось и в работе [3]. Мы предполагаем, что это связано с усилением конвективной неустойчивости в дневные часы [12]. Анализ данных метеостанции показал, что в дневные часы скорость ветра возросла до 4 м/с, в то время как утром и ночью она была около 1 м/с, что косвенно подтверждает наши предположения об усилении гидродинамической неустойчивости атмосферы в дневной период. Значения структурных функций тропосферной задержки за дневной период были аппроксимированы степенной функцией с показателем степени 0,7, что соответствует результатам ранее проведённых исследований макротурбулентности [13], где также были построены структурные функции тропосферной задержки по данным систем GPS. Для утреннего и вечернего периодов измерений показатель степени равен $0,1 \div 0,2$. Рисунок 1 показывает, что рост структурной функции в области масштабов $1 \div 15$ км и $15 \div 35$ км имеет различную степень изменчивости в течение суток. Это может быть обусловлено высотно-временной изменчивостью флуктуаций индекса рефракции радиоволн.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ ФУНКЦИИ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН ДЛЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С МАСШТАБАМИ ОТ 1 ДО 35 КМ

В данном разделе рассмотрим закономерности структурных функций индекса рефракции дециметровых радиоволн для случая, когда расстояния между пунктами приёма радиосигналов составляют несколько километров. Оценка проводилась на поверхности Земли (на высоте антенны) и на высотах 160; 450; 800; 1 400; 3 000; 5 000; 8 000 и 10 000 м относительно поверхности Земли. На рис. 2 представлены примеры графиков структурных функций и их аппроксимаций для нескольких исследуемых высот.

На основании полученных результатов можно отметить существенный рост горизонтальной структурной функции индекса рефракции радиоволн с увеличением масштаба неоднородностей, т. е. с ростом расстояния между приёмными пунктами радиосигналов. Это означает, что вклад неоднородностей в дисперсию индекса рефракции растёт с ростом размеров неоднородностей на всех высотах.

Значения структурных функций были аппроксимированы степенными функциями с показателем степени $0,69 \div 0,82$ и структурной постоянной $1,2 \div 1,7$. Самая большая структурная функция со структурной постоянной 1,72 и степенью 0,82 получена для приземного слоя. Это соответствует результатам ранее проведённых исследований макротурбулентности в приземном слое [10, 13, 14, 17].

3. СРАВНЕНИЯ С ИЗМЕРЕНИЯМИ СТРУКТУРНОЙ ФУНКЦИИ ПО ДАННЫМ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Мы сравнили полученные результаты с независимыми оценками структурных функций индекса рефракции радиоволн в приземном слое. Для того, чтобы оценить влияние неоднородностей исследуемых масштабов, использовались данные наземной сети станций атмосферного мониторинга с ежеминутными измерениями метеопараметров в приземном слое атмосферы [15]. Станции разнесены на расстояния от 0,9 до 6,3 км относительно друг друга. Измерения сети станций, расположенных в городской черте, охватывают широкий спектр атмосферных параметров. Аппаратура, методика и результаты многолетних измерений опубликованы в [10, 15]. Так, структурные функции пространственной изменчивости температуры и концентрации водяного пара показали высокую степень независимости от преимущественного направления ветра [15].

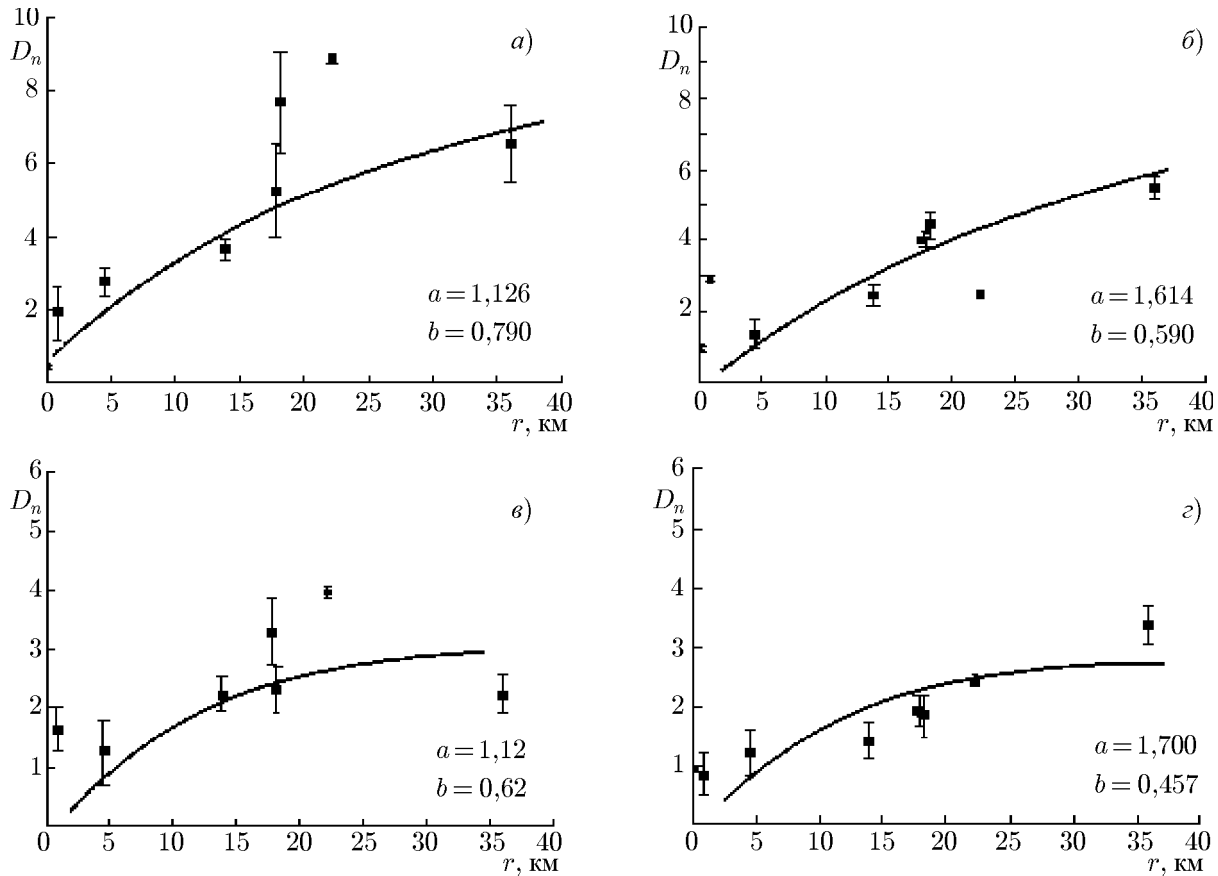


Рис. 2. Структурные функции индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приёмных пунктов спутниковых навигационных систем в интервале масштабов $0,85 \div 35$ км и их аппроксимации степенной функцией $D_n = ar^b$ вблизи поверхности Земли (а) и на высотах 1400 м (б), 5800 м (в) и 8000 м (г)

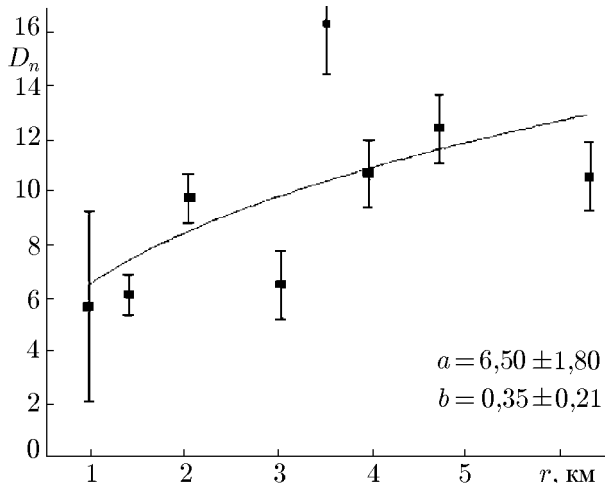


Рис. 3. Структурная функция индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям водяного пара и плотности воздуха в приземном слое атмосферы и её степенная аппроксимация $D_n = ar^b$

В пределах доверительных интервалов структурные функции совпадают для любых преимущественных направлений ветра.

По многолетним данным измерений в приземном слое, собранным станциями атмосферного мониторинга, был рассчитан индекс рефракции и построена структурная функция и её степенная аппроксимация (см. рис. 3).

Согласно теории турбулентности показатель степени порядка $0,5 \div 0,8$ соответствует началу области крупномасштабной квазидвумерной турбулентности (по стандартной классификации неоднородностей). В исследованном диапазоне масштабов существенно действие архимедовой силы, но при этом вертикальные масштабы неоднородностей становятся много меньше их горизонтальных размеров [14].

Из сравнения данных наших измерений по сети приёмников спутниковых навигационных систем (рис. 2) и по сети станций атмосферного

мониторинга (рис. 3) можно сделать следующие выводы.

В интервале размеров неоднородностей $1\div 6$ км сравнение структурных функций индекса рефракции в нижнем слое атмосферы по измерениям сети приёмных станций спутниковых навигационных систем и многолетних метеонаблюдений показывают хорошее согласие по величине структурных функций и по показателю степени аппроксимации. Однако данные с сети станций, разнесённых на расстояние до 35 км, показывают, что мезомасштабные неоднородности на расстоянии более 6 км вносят вклад в изменения индекса рефракции радиоволн как в приземном слое, так и в более высоких слоях тропосферы.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что дистанционное зондирование тропосферы сигналами спутников ГЛОНАСС и GPS, проведённое сетью приёмников, позволяет исследовать количественные характеристики неоднородностей индекса рефракции дециметровых радиоволн на разных высотах тропосферы, в частности, горизонтальные структурные функции индекса рефракции и тропосферной задержки сигналов, включая их суточные вариации. Сравнение полученных в работе результатов с данными независимых наземных измерений структурных функций индекса рефракции и высотных радиозондовых измерений показало хорошее согласие. Полученные в данной статье результаты и выводы не противоречат известным публикациям [6, 13, 16, 17].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П162).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуторова О. Г., Тептин Г. М., Васильев А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 1. С. 1.
2. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
3. Тептин Г. М., Хуторова О. Г., Зинин Д. П., Хуторов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 1. С. 1.
4. Яковлев О. И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
5. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and practice. Wien, New York: Springer-Verlag, 1994. 356 p.
6. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
7. Гурвич А. С., Воробьёв В. В., Маракасов Д. А., Фёдорова О. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 9. С. 747.
8. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидродинамика. Т. 1. М.: Наука, 1965. 539 с.
9. Teptin G. M., Stenin Yu. M. Inhomogeneous structure of lower ionosphere and radio wave propagation. Kazan: Kazan University Publisher, 2007. 150 с.
10. Тептин Г. М., Хуторова О. Г., Журавлёв А. А. и др. // Уч. записки Казанского университета. 2010. Т. 152, № 1. С. 23.
11. Numerical Recipes in C. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 1018 p.
12. Шакина Н. П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 308 с.

13. Vennebusch M., Schön S. // Geophys. Res. Abstr. 2011. V. 13. P. 40.
14. Khutorov V. E. // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. 2008. V. 14, No. 2. P. 20.
15. Журавлёв А. А., Хуторова О. Г., Тептин Г. М. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 6–7. С. 543.
16. Flores A., de Arellano J. V-G., Gradinarsky L.P., Rius A. // Trans. Geosci. Remote Sensing. 2001. V. 39, No. 2. P. 439.
17. Davies O. T., Mitchell C. N., Spenser P.S.J., Watsons P. A. // Int. Conf. Antennas and Propagation. 2001. No. 480. P. 288.

Поступила в редакцию 9 апреля 2012 г.; принята в печать 30 мая 2012 г.

**ON THE POSSIBILITY OF STUDYING THE HORIZONTAL STRUCTURAL
FUNCTIONS OF THE TROPOSPHERIC RADIO-WAVE REFRACTIVE INDEX
USING A NETWORK OF GPS AND GLONASS RECEIVING STATIONS**

V. E. Khutorov, A. A. Zhuravlev, and G. M. Teptin

We present the results of experimental study of the horizontal structural functions of the tropospheric delay of radio waves and the altitude variations (0–10 km) of the structural function of the radio-wave refractive index, calculated using the data of the networks of the GPS and GLONASS satellite navigational systems spaced at 1–35 km.