

УДК 537.876:551.51

ПАССИВНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ СЕТЬЮ ПРИЁМНИКОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В Г. КАЗАНИ

О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин, А. А. Васильев, В. Е. Хуторов, А. П. Шлычков

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

В работе представлены результаты экспериментального исследования структуры индекса рефракции радиоволн и её динамики сетью из семи наземных приёмников систем GPS и ГЛОНАСС, расположенных в г. Казани. Показано, что результаты дистанционного зондирования хорошо согласуются с данными метеостанции, радиозондирования и реанализа. Среднеквадратичное отклонение значений индекса рефракции, полученных по результатам пассивного зондирования, от радиозондовых данных составило 2% от среднего значения на высоте до 500 м. Обнаружено, что структура индекса рефракции имеет как межсуточные вариации, так и мезомасштабную пространственную и временную изменчивость.

В настоящее время актуальны задачи развития средств всепогодного зондирования атмосферы. В связи с этим несомненный интерес представляют широкие возможности применения радиосигналов глобальных сетей позиционирования GPS и ГЛОНАСС. В США, Японии и Западной Европе достаточно много исследований посвящено измерениям вариаций трёхмерных распределений содержания водяного пара в тропосфере с помощью наземных приёмников GPS (см., например, [1–5]). Показано, что данные приёмников GPS — инструмент исследования тропосферы с большим временным разрешением [5]; пространственное разрешение зависит от плотности расположения приёмников. В России глобальные навигационные спутниковые системы используются для томографии ионосферы или стратосферы [6–8], но мало работ по использованию спутниковых навигационных систем для исследования тропосферы, особенно пограничного слоя. Можно отметить работы [9–11], которые подробно освещают методические вопросы радиозондирования тропосферных параметров на основании рефрактометрии. Однако экспериментальных результатов зондирования тропосферы с помощью наземных приёмников глобальных навигационных спутниковых систем в России пока не было.

Цель данной работы состоит в том, чтобы представить экспериментальные результаты пассивного зондирования структуры индекса рефракции радиоволн в тропосфере с помощью системы наземных приёмников GPS и ГЛОНАСС, разнесённых в пространстве.

Спутники глобальных навигационных систем излучают радиосигналы на длинах волн 19 и 24 см, что обеспечивает всепогодный приём на поверхности Земли. Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем зависят от коэффициента преломления радиоволн в атмосфере. Основной характеристикой атмосферы как среды распространения является индекс рефракции. Обычно используют следующее выражение, связывающее индекс рефракции N и коэффициент преломления n радиоволн с параметрами атмосферы и частотой:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77,6p[\text{мбар}]/T[\text{K}] + 3,73 \cdot 10^5 e[\text{мбар}]/(T[\text{K}])^2 + 4,03 \cdot 10^7 N_e[\text{м}^{-3}]/(f[\text{Гц}])^2, \quad (1)$$

где первое слагаемое определяется влиянием неполярных газов, а второе — водяным паром, p и T — давление и температура воздуха соответственно, e — парциальное давление паров воды,

N_e — электронная концентрация, f — частота радиоволн [12]. Это выражение позволяет оценить зависимость коэффициента преломления от параметров атмосферы и определить степень их влияния на условия распространения радиоволн.

Наземные приёмники измеряют параметры принятых радиосигналов (групповой и фазовой путь от спутника до антенны приёмника, доплеровский сдвиг частоты несущей и др.), флуктуации которых связаны с различными атмосферными процессами, в том числе с вариациями параметров тропосферы [1, 13].

Расстояние до спутника, измеренное приёмником, можно представить в виде

$$L_i^j = \rho_i^j + I_i^j + \Delta L_i^j + \varepsilon_i^j, \quad (2)$$

где индексы i и j — номера приёмника и спутника соответственно, ρ — истинное расстояние между спутником и приёмником (рассчитывается по известным координатам антенн и эфемеридам спутников [1]); I и ΔL — ионосферная и тропосферная задержки радиосигнала соответственно, измеряемые в единицах длины; ε — ошибки измерения, в том числе ошибки за счёт отличия отсчётов времени приёмника и спутника. Каждый приёмник измеряет расстояние двумя способами — по времени распространения сигнала (кодовые измерения или псевдодалность, в этом случае ионосферные и тропосферные задержки зависят от групповой скорости распространения в среде) и по фазе принятого сигнала (в этом случае задержки определяются фазовой скоростью).

Дополнительный путь радиоволны от спутника до антенны, связанный с рефракцией в атмосфере [1, 5], равен

$$L_i^j = I_i^j + \Delta L_i^j = 10^{-6} \int_S N(s) ds. \quad (3)$$

Интеграл взят по линии радиотрассы от спутника до антенны. Вклад ионосферы определяется выражением $I = 40,3 \text{ПЭС} [10^6/\text{м}^2] / (c[\text{м}/\text{с}](f[\text{Гц}])^2)$, где ПЭС — интегральное содержание электронов вдоль радиотрассы, f — частота несущей, c — скорость света. Частотная зависимость ионосферной поправки позволяет вычесть её из (2), используя измерения на двух рабочих частотах [1, 5].

В Казанском университете организована сеть приёмников систем GPS и ГЛОНАСС, пространственно разнесённых на расстояния от 3 до 35 км [14]. Расстояния между станциями выбраны так, чтобы отслеживать вариации мезомасштабной структуры индекса рефракции [15]. Расположение антенн было выбрано таким образом, чтобы обзор каждого из приёмников был как можно более полным, а влияние многолучевости было минимальным.

Наличие сети приёмников GPS и ГЛОНАСС позволяет снимать характеристики радиосигнала на трассах Земля—спутник и вычислять соответствующие тропосферные задержки в пространственно-разнесённых пунктах. Двухчастотная система приёмников позволяет исключить влияние ионосферы на вычисление значений тропосферной задержки.

Система спутников GPS и ГЛОНАСС позволяет одновременно наблюдать на небесной полусфере несколько источников радиосигнала, что позволяет дистанционно зондировать сеть антенн различные участки тропосферы под разными углами места радиотрасс [9].

Для решения обратной задачи восстановления высотной и горизонтальной структуры тропосферы мы выбрали данные фазовых измерений дальности до каждого спутника, т. к. они более точны, чем кодовые измерения. Для исключения ошибок, обусловленных отличием отсчётов времени, применяется метод разностных измерений для разнесённых пунктов с известными координатами [1].

Флуктуации измеряемых параметров радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем при распространении в неоднородной атмосфере обусловлены изменением индекса

рефракции. Высотный градиент метеопараметров в атмосфере формирует высотный профиль коэффициента преломления радиоволн и вызывает явление вертикальной рефракции. Температура и влажность часто изменяются с высотой не монотонно. Наличие температурной инверсии на различных высотах показывают, например, радиометрические исследования [16]. Вертикальные градиенты показателя преломления в тропосфере составляют от нескольких $N/\text{м}$ до $10 \div 20 N/\text{м}$ ($1 N = (n-1) \cdot 10^6$ соответствует изменению электрической длины пути на 1 мм на километр трассы) [15]. Интенсивность изменений метеопараметров падает с увеличением высоты над земной поверхностью. Динамические процессы в реальной атмосфере формируют неоднородную изменчивую трёхмерную структуру коэффициента преломления [5, 15].

Таким образом, вертикальный профиль индекса рефракции характеризует стратификацию атмосферы, а его изменчивость — флуктуации атмосферных параметров. Тропосферная задержка радиосигнала ΔL (измерять эту величину принято в единицах длины), измеренная каждой антенной в приближении сферической симметрии атмосферы с учётом искривления луча равна

$$\Delta L = \int_{h_a}^{H_t} \frac{(r_0 + h) N(h)}{\sqrt{(r_0 + h)^2 + \left[\frac{n_0}{1 + N(h)} \right] r_0^2 \cos^2 \theta}} dh, \quad (4)$$

где θ — угол места трассы спутник—приёмник, r_0 — радиус Земли, h — высота, n_0 — приземный коэффициент преломления. Интеграл взят от высоты приёмной антенны h_a до высоты тропосферы H_t . Модельные расчёты решения прямой задачи влияния индекса рефракции тропосферы на измеренные разности фаз показали, что высоту тропосферы можно взять приближённо равной 10 км. При фазоразностном методе вклад нейтральной атмосферы, расположенной выше 10 км, меньше, чем точность измерения фазы приёмником.

Выражение (4) получено в [12] и учитывает влияние атмосферы и на искривление трассы, и на дополнительную задержку радиосигнала в тропосфере за счёт того, что скорость распространения не равна скорости света, а уменьшается в n раз. При вертикальной трассе (угол места равен 90°) зенитная тропосферная задержка минимальна, её значение меняется в пределах $1,9 \div 2,8$ м [1, 2]. Наклонная тропосферная задержка может достигать нескольких десятков метров [1–5].

Задача сводится к решению интегрального уравнения (4) относительно высотного профиля индекса рефракции. Уравнение (4) имеет нелинейное ядро, в которое входит искомым профиль, поэтому мы применили для его решения метод Тихонова решения обратных задач [17] и итерационный алгоритм. Особенности метода в применении к рефрактометрическому определению профиля индекса рефракции были исследованы в [9, 10]. При решении мы учитывали эмпирические данные профилей индекса рефракции, полученные по радиозондовым данным за период с 1997 по 2001 год. В качестве начального приближения использовались среднеголетние профили для каждого сезона. Минимизация функционала Тихонова проводилась в граничных условиях, также заданных данными эмпирической модели. Было установлено, что точность решения слабо зависит от начального приближения, подставляемого в ядро, но сильно зависит от параметра минимизации функционала Тихонова. Обычно решение сходится к третьему шагу итерационного алгоритма. При разработке методики мы учитывали точностные характеристики фазовых измерений. Модельные расчёты решения обратной задачи показали, что решение достигается даже при ошибках измерения фазы на порядок больших, чем в применяемой аппаратуре.

Для иллюстрации полученных решений на рис. 1 представлены результаты в сравнении с профилями индекса рефракции, рассчитанными по данным реанализа [18]; также приведены расчёты индекса рефракции по данным метеостанции [19] для поверхности Земли. Решения, полученные

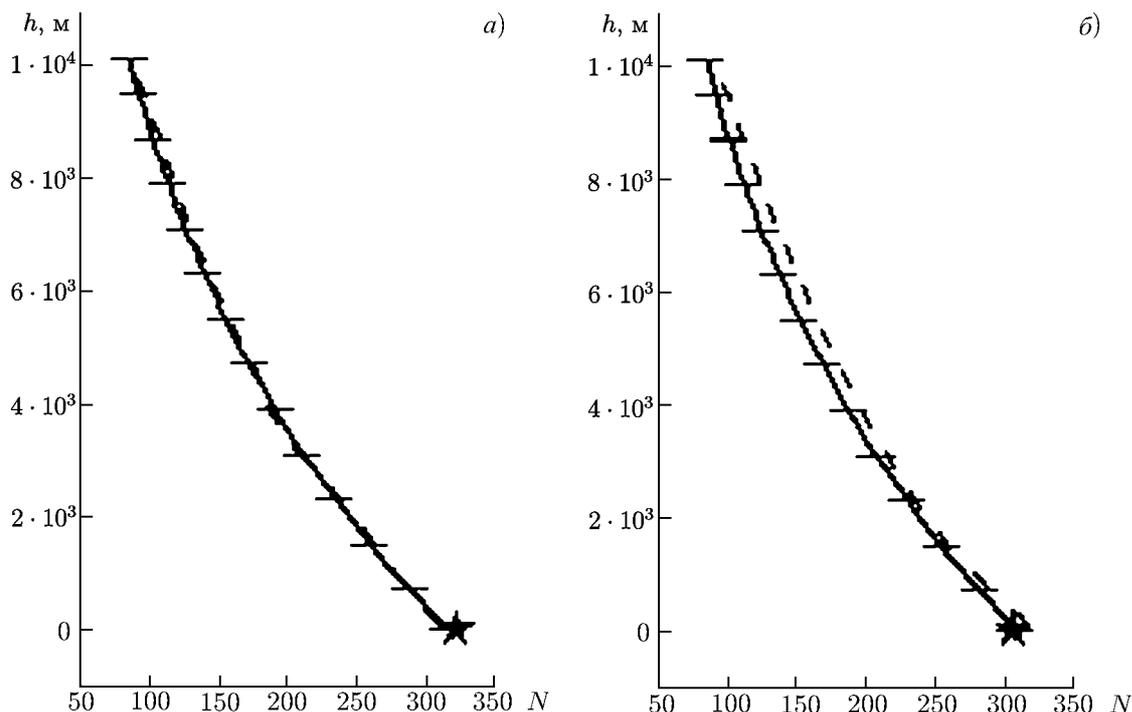


Рис. 1. Высотные профили индекса рефракции радиоволн для 01.12.2008 (а) и 01.03.2009 (б). Сплошные линии соответствуют усреднённым решениям, полученным по данным сети спутников (горизонтальными отрезками показаны среднеквадратичные отклонения), штриховые линии — решениям, полученным по данным реанализа, звёздочкой показано значение индекса рефракции на поверхности Земли по данным метеостанции

по 30-минутным интервалам измерения сетью станций, усреднялись; среднеквадратичные отклонения также представлены на графиках. Первый пример (от 01.12.2008) показывает совпадение профилей в пределах среднеквадратического отклонения. Совпадение можно объяснить тем, что данные реанализа сильно сглажены, как и усреднённый профиль, полученный по данным сети приёмников, охватывающих территорию 35×20 км. Второй пример (от 01.03.2009) демонстрирует хорошее совпадение решений и независимых данных только на высотах $500 \div 3000$ м. Также стоит отметить хорошее совпадение с измерениями метеостанции. Видимо, для этого момента времени локальные условия отличаются от усреднённых моделей реанализа. Из данных метеостанции следует, что в момент измерений, действительно, наблюдалось временное локальное повышение давления и понижение температуры. Таким образом, можно заключить, что решение обратной задачи по данным глобальных навигационных спутниковых систем точно отражает реальные условия (во всяком случае, вблизи поверхности Земли).

Мы провели сравнение решения обратной задачи с профилями индекса рефракции, определёнными по радиозондовым данным за период с 05.08 по 31.08.2008. На рис. 2 показан пример сравнения профилей. По всему периоду сравнения мы определили средние отклонения результатов пассивного зондирования индекса рефракции от измеренных аэрологическим способом; оно составило $0,2 N$ в слое до 500 м и $-1,4 N$ на высотах $9500 \div 10000$ м, среднеквадратичное отклонение составило 6,8 и 3,4 N соответственно. Такие величины отклонений показывают хорошее соответствие результатов дистанционного зондирования и независимых радиозондовых измерений. Среднеквадратические отклонения, скорее всего, определяются пространственными мезомасштабными вариациями индекса рефракции; как показано в [20], их интенсивность уменьша-

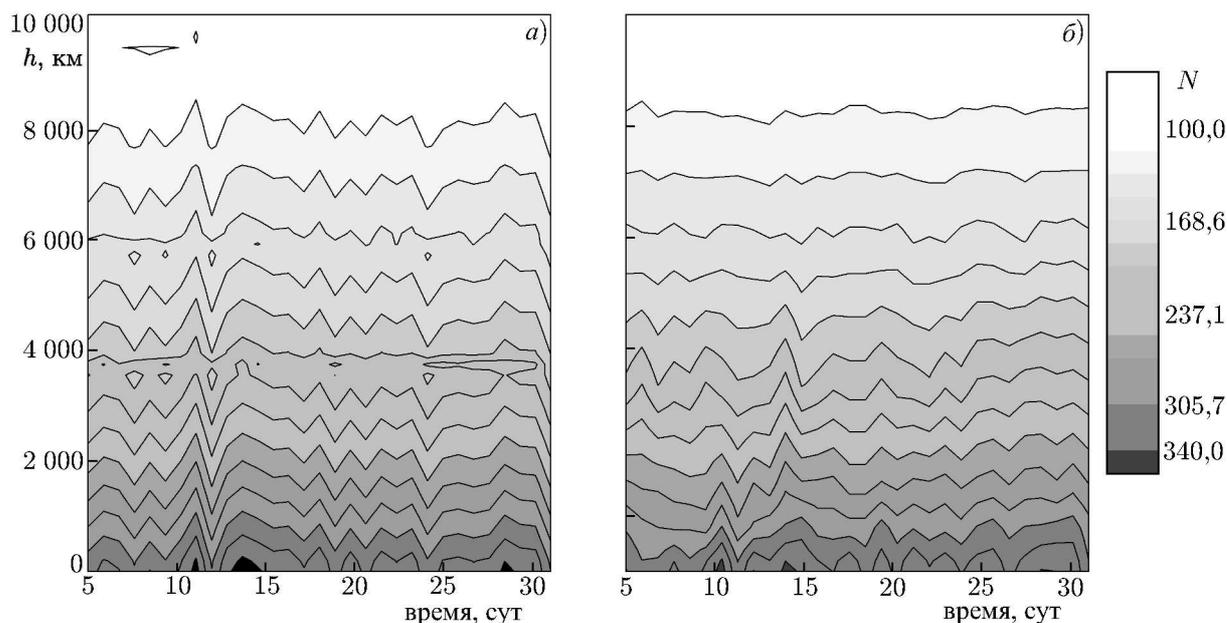


Рис. 2. Высотные профили индекса рефракции радиоволн, полученные по данным сети приёмников спутниковых систем (а) и данными радиозондирования (б) для августа 2008 года

ется с высотой. Из рис. 2 видно, что структура индекса рефракции обнаруживает существенные межсуточные вариации, связанные с синоптическими атмосферными процессами. Среднеквадратическое отклонение индекса рефракции от среднего составляет 15 и 5 N на высотах до 500 и 9 500÷10 000 м соответственно. Как видно, отличия между данными дистанционного и аэрологического зондирования значительно меньше, чем межсуточные вариации индекса рефракции. Они определяют основной вклад в дисперсию индекса рефракции на поверхности Земли, составляющий 46 %, как показано в работе [15], в которой по данным наземных станций атмосферного мониторинга для региона Республики Татарстан сделаны оценки долей дисперсии индекса рефракции радиоволн за счёт атмосферных процессов различного масштаба.

Высокая частота измерений позволяет получить вариации индекса рефракции радиоволн, обусловленные суточной динамикой метеопараметров. На рис. 3 представлены примеры суточного хода индекса рефракции радиоволн на поверхности Земли и на высоте 100 м для 29.09.2008 и 01.12.2008. Для сравнения представлены также суточные вариации, рассчитанные по данным метеостанции [19]. Метеостанция расположена на расстоянии около 10 км от ближайшей антенны. Данные метеостанции представлены с разрешением 3 часа, суточный ход по данным сети приёмников дан с временным разрешением 30 мин. Видно, что совпадение вблизи поверхности Земли хорошее с учётом того, что в измерениях сети приёмников глобальных навигационных спутниковых систем кроме суточного хода проявляются вариации внутрисуточные, обусловленные мезомасштабными или макротурбулентными процессами [15]. Подобные вариации были нами исследованы ранее по приземным измерениям сети станций атмосферного мониторинга [17]. Видно, что на высоте 100 м суточный ход индекса рефракции в целом почти повторяет приземные вариации (см. рис. 3), однако расчёты показывают, что высотный градиент в течение суток непостоянен, меняется он и от суток к суткам.

Обратную задачу восстановления пространственных неоднородностей индекса рефракции можно решить аналогичным путём, не применяя приближения сферической симметрии атмосферы. В этом случае в (3) и (4) предполагается зависимость индекса рефракции, как от высоты, так и от горизонтальных координат.

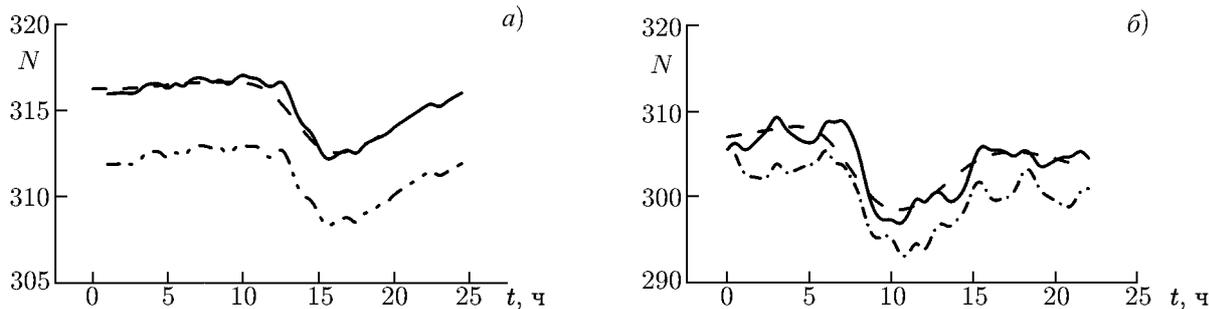


Рис. 3. Примеры суточного хода индекса рефракции радиоволн: 01.12.2008 (а) и 29.09.2008 (б). Сплошные линии соответствуют данным спутниковых систем (приземное значение), штриховые — данным метеостанции, штрих-пунктирные — данным спутниковых систем на высоте 100 м

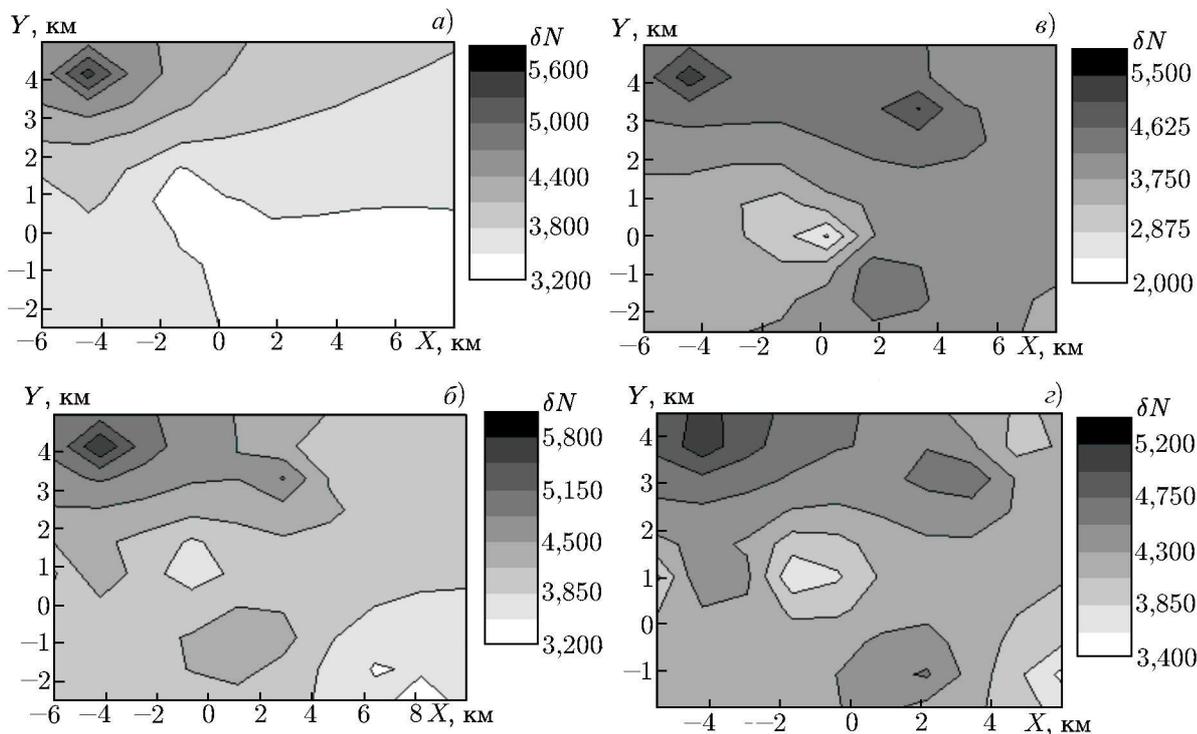


Рис. 4. Пространственные вариации индекса рефракции радиоволн 10.11.2010: 12:00–12:15 UT (а), 12:15–12:30 UT (б), 12:30–12:45 UT (в), 12:45–13:00 UT (г). Шкала оттенков серого соответствует отклонению индекса рефракции от среднего по слою δN . По осям отложено расстояние от геометрического центра антенной системы

Основная идея применённого нами метода заключается в том, что измеренные тропосферные задержки радиосигналов можно аппроксимировать суммой линейно независимых функций от координат за вычетом вклада в фазовый путь полученного решения среднего вертикального профиля. В результате получим систему линейных уравнений, решая которую можно восстановить структуру отклонений индекса рефракции радиоволн от среднего профиля, характеризующую пространственное изменение метеопараметров атмосферы.

На рис. 4 представлены примеры горизонтальной структуры вариаций индекса рефракции радиоволн и её динамики в приземном слое атмосферы, полученные по данным сети станций глобальных навигационных спутниковых систем 10.11.2010 с 15-минутным усреднением. Обнару-

жено, что для указанного времени наблюдаются неоднородности индекса рефракции с размерами от 1 до 10 км. Такие же характерные масштабы, с близкими амплитудами возмущения индекса рефракции ($5 \div 10 N$) обнаружены как по данным сети станций атмосферного мониторинга [15], так и с помощью численного эксперимента [20].

ВЫВОДЫ

В работе показано, что дистанционное зондирование тропосферы по сигналам спутников ГЛОНАСС и GPS, проведённое сетью приёмников в г. Казани, позволяет исследовать высотные профили индекса рефракции, их суточную и внутрисуточную динамику и пространственную мезомасштабную неоднородную структуру тропосферы. Показано, что структура индекса рефракции обнаруживает как межсуточные вариации, так и мезомасштабную пространственную и временную изменчивость.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global positioning system. Theory and practice. Wien: Springer-Verlag, 1994. 356 p.
2. Bevis M. S., Businger S., Herring T. A., et al. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 15 787.
3. Bender M., Raabe A. // Ann. Geophys. 2007. V. 25. P. 1 727.
4. Tsuda T., Heki K., Miyazaki S. // Earth Planets Space. 1998. V. 50, No. 10. P. i–v.
5. Davies O. T., Mitchell C. N. // IEEE Proc. Microwave Antennas Propagat. 2004. V. 151, No. 1. P. 1.
6. Павельев А. Г., Матюгов С. С., Яковлев О. И. // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 9. С. 1 081.
7. Кан В., Матюгов С. С., Яковлев О. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 8. С. 651.
8. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
9. Азизов А. А., Гайкович К. П., Кашкаров С. С., Черняева М. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 9. С. 1 116.
10. Гайкович К. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35, № 3–4. С. 211.
11. Чукин В. В. // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2009. Т. 6, № 2. С. 244.
12. Яковлев О. И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
13. Казаков Л. Я., Ломакин А. Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976. 165 с.
14. Khutorova O. G., Vasilyev A. A., Maksimov A. G. // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. 2007. V. 13, No. 1. P. 15.
15. Хуторова О. Г. Волновые процессы в приземной атмосфере по синхронным измерениям примесей и метеопараметров. Казань: Инновационные технологии, 2005. 275 с.
16. Миллер Е. А., Воробьёва Е. А., Кадыгров Е. Н. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 552.
17. Манжиров А. В., Полянин А. Д. Методы решения интегральных уравнений: Справочник. М.: Факториал, 1999. 272 с.

18. http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis/rean_model.html.
19. <http://meteo.infospace.ru>.
20. Тептин Г. М., Хуторова О. Г., Зинин Д. П., Хуторов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 1. С. 1.

Поступила в редакцию 27 января 2011 г.; принята в печать 17 февраля 2011 г.

**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**

O. G. Khutorova, G. M. Tep tin, A. A. Vassilyev, V. E. Khutorov, and A. P. Shlychkov

We present the results of an experimental study of the structure of the radiowave refractivity and its dynamics by a network of seven ground-based GPS and GLONASS receivers in Kazan, Russia. It is shown that the remote sensing results agree well with the data of weather stations, radio sounding, and reanalysis. The standard deviation of the refractivity value, which are obtained using the sensing results from the radio sounding data amounts to 2% of the average value at altitudes of up to 500 m. It is found that the refractivity structure has overnight variations as well as and mesoscale spatial and temporal variability.