

Проявление городского острова тепла в пространственно-временных флуктуациях индекса рефракции электромагнитных волн

В.Е. Хуторов, О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин*

*Казанский федеральный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18*

Поступила в редакцию 20.01.2015 г.

Рассмотрена задача экспериментального исследования распространения радиоволн дециметрового диапазона в тропосфере в городских условиях. Приведен анализ структурной функции тропосферной задержки дециметровых радиоволн за день по измерениям сигналов ГЛОНАСС и GPS в г. Казань. Обнаружено, что для трасс над городом вклад тропосферы в дисперсию задержки дециметровых радиоволн существенно различается от вклада внегородских трасс.

Ключевые слова: городской остров тепла, рефракция, атмосферные неоднородности, GPS, ГЛОНАСС; urban heat island, refraction, atmospheric disturbances, GPS, GLONASS.

В настоящее время [1] для различных практических и научных целей все более важным становится использование данных, собранных с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) за длительный период времени. В общем случае это дает возможность получить практически «мгновенное» многомерное поле значений физических параметров атмосферы, что позволяет исследовать чрезвычайно сложную структуру как неоднородностей тропосферы, так и ее динамики фактически одновременно с измерениями принятого сигнала [2, 3]. Известно, что получение подобных результатов другими методами является дорогостоящим и не всегда выполнимым [4].

Между климатом города и его окрестностей часто наблюдается существенная разница. В крупных городах температура воздуха может быть на несколько градусов выше, чем в сельской местности. Среднегодовые температуры в крупных городах превышают температуры в окрестностях в среднем на 1–2 °С.

Городской климат относится к явлениям мезомасштаба, которые имеют протяженность от нескольких до десятков километров по горизонтали и до нескольких сотен метров по вертикали. Поле температуры над городом характеризуется замкнутыми изотермами, получившими название «городской остров тепла». Основные закономерности формирования и конфигурации острова тепла для крупных городов следующие: форму его границ определяют особенности орографии территории, направления

и скорости господствующих ветров; на его интенсивность оказывают влияние размеры городской территории, ее пространственная структура, интенсивность промышленной деятельности и внутригородской ход фоновых метеопараметров [5].

В последние годы при изучении острова тепла рассматривают также и вертикальное распределение температуры до 1000 м с помощью приборов дистанционного зондирования: стационарных и мобильных профиломеров. Такое исследование дает возможность изучить трехмерную картину термических процессов в пограничном слое атмосферы над крупным городом [5, 6].

Каждую секунду в любую точку Земли посылают сообщения спутники ГЛОНАСС, GPS и других глобальных навигационных спутниковых систем. Их радиосигналы, проходя через атмосферу, «замедляются» за счет влияния атмосферных газов. Измеряя это замедление, можно оценить состояние атмосферы, измерить коэффициент преломления электромагнитных волн. Важное достоинство радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем — это способность проходить через все слои атмосферы в любую погоду. Этим объясняется то внимание, которое уделяется спутниковым системам в различных программах мониторинга атмосферы [7–9].

Измеренная наземным приемником фаза сигнала, излученного навигационным спутником, несет в себе информацию, характеризующую состояние атмосферы. Эта информация определяется индексом рефракции [1]:

$$N = 77,6890 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + 71,2952 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + 375463 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}, \quad (1)$$

* Владислав Евгеньевич Хуторов (pri870@yandex.ru);
Ольга Германовна Хуторова (olga.khutorova@ksu.ru); Герман Михайлович Тептин.

где P_d – парциальное давление сухих газов, мбар; T – температура воздуха, К; e – парциальное давление водяного пара, мбар; Z_d и Z_w – коэффициенты сжимаемости, близкие к единице. Первое слагаемое пропорционально плотности атмосферы, а второе и третье определяются влажностью. В эксперименте по измерениям приемника оценивается параметр, характеризующий состояние тропосферы, – зенитная тропосферная (полная) задержка ZTD, которая может быть определена через интеграл от индекса рефракции [1, 2, 10]:

$$ZTD = \int_{\text{Приемник}}^{\text{Спутник}} N \cdot 10^{-6} dh. \quad (2)$$

Интеграл берется от высоты антенны приемника до высоты антенны спутника в зенитном направлении. Этот параметр традиционно измеряется в единицах длины [10]. Характерная величина зенитной тропосферной задержки составляет 2,2–2,4 м, но мгновенные значения подвержены влиянию конкретной метеорологической ситуации. В [7] показано, что поля метеопараметров оказывают существенное влияние на суточные и синоптические вариации зенитной тропосферной задержки сигналов спутниковых навигационных систем. Предполагается влияние конвекции, т.е. усиление неоднородности за счет температурных флуктуаций и возрастающей концентрации водяного пара в тропосфере.

Для исследования конвективных процессов масштабов города выбран летний период времени, так как летом усиление мезомасштабных вихрей за счет конвекции должно проявиться сильнее [11]. Подобраны периоды наблюдений, для которых отсутствуют фронты, четко проявляется суточный ход метеопараметров [12]. Для того чтобы оценить неоднородную структуру индекса рефракции дециметровых радиоволн на разных высотных уровнях, составляется система из интегральных уравнений по данным измерений. Система решается относительно разности индекса рефракции дециметровых радиоволн на каждом из высотных уровней с помощью метода сингулярных разложений [13].

Для количественной оценки мезомасштабных флуктуаций строятся горизонтальные структурные функции индекса рефракции дециметровых радиоволн на разных высотных уровнях. Физический смысл структурной функции D_N есть среднее квадрата флуктуаций исследуемой величины (индекса рефракции электромагнитных волн N) в области соответствующих пространственных масштабов в процессах со стационарным приращением [14]:

$$D_N(r) = \langle (N(r + \Delta r) - N(r))^2 \rangle. \quad (3)$$

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

На рис. 1 приведен пример вертикальных вариаций структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных

пунктов ГНСС в интервале масштабов 0,85–35 км. Видно, что максимального значения структурные функции индекса рефракции достигают в дневное время для процессов с горизонтальными масштабами 22–25 км. Эти масштабы соответствуют линейным масштабам города. Обнаружено, что с ростом высоты влияние города ослабляется, но остается существенным, несмотря на падение плотности с высотой.

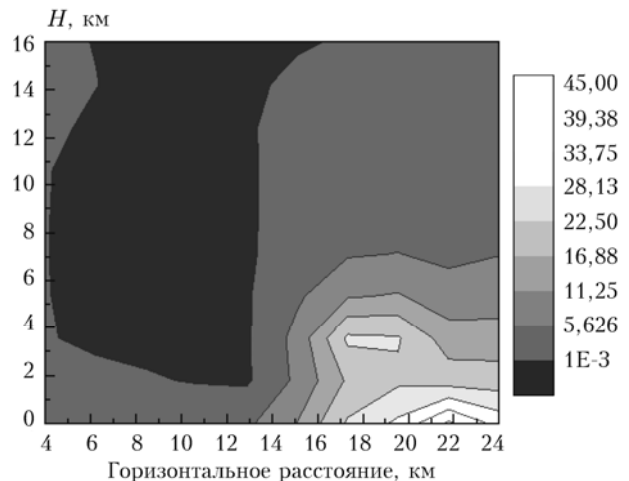


Рис. 1. Вертикальная вариация структурной функции индекса рефракции дециметровых радиоволн по измерениям сети приемных пунктов ГНСС в интервале масштабов 0,85–35 км за 17.06.2009 г. Цветовая шкала выражена в $N\text{-ед}^2$

Антенна приемника дает возможность одновременно принимать радиоизлучение систем ГНСС с разных азимутальных направлений, что позволяет определить вклад разных участков тропосферы в дисперсию фазовых флуктуаций принятых сигналов. На рис. 2 показана карта-схема эксперимента.

Видно, что по азимуту трасс сигналов можно выбрать измерения над городом и вне его. Для этого по данным ежесекундных измерений за 23.08.2009 г. были рассчитаны двумя способами значения дисперсии разности зенитной тропосферной задержки радиоволн между двумя пунктами с величиной базы 18 км. В первом случае для расчета зенитной тропосферной задержки брались радиотрассы, проходящие над городом, во втором – вне города. Результаты представлены на рис. 3.

Сравнение данных показало, что в среднем за день значения дисперсии флуктуаций ZTD с использованием радиотрасс над городом больше на 61%, чем вне города. Максимальной величины это различие достигает в период 12:00–16:00 по местному времени и минимальной – в ночное время. Основная причина различий – это конвекция, вызванная более высокой температурой в черте города, которая сопровождается выносом влаги с подстилающей поверхности.

Из полученных результатов следует, что городские условия оказывают существенное влияние на флуктуации атмосферных параметров и, соответственно, на распространение электромагнитных волн в тропосфере.



Рис. 2. Карта-схема эксперимента. Точкам обозначены приемники, линиями разграничены секторы с городской застройкой и без застройки

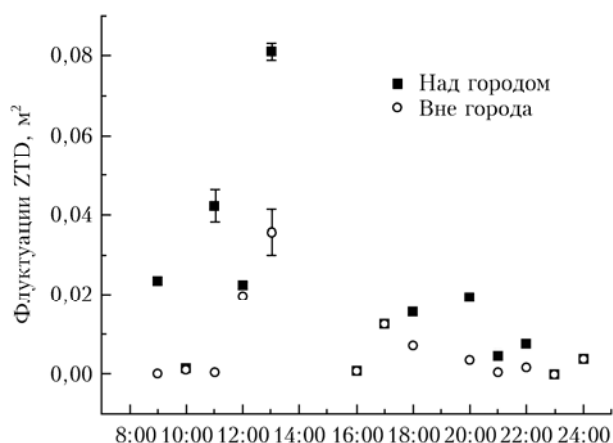


Рис. 3. Суточный ход флуктуации зенитной тропосферной задержки для трасс, проходящих над городом и вне города

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-97054).

1. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
2. Хуторов В.Е., Журавлев А.А., Тептин Г.М. О возможности исследования горизонтальных структурных функций коэффициента преломления радиоволн в тропосфере с помощью сети приемных пунктов GPS-ГЛОНАСС // Изв. вузов. Радиофиз. 2012. Т. 55, № 5. С. 1–8.
3. Хуторова О.Г., Васильев А.А., Хуторов В.Е. О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS-ГЛОНАСС // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 510–514.
4. Зинченко Г.С., Матющенко Ю.Я., Павлов В.Е., Смирнов С.В. О селекции данных AERONET. Часть 3: об-

- лачность и эффективность функционирования солнечных фотометров в южных районах Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 19–22.
5. Миллер Е.А., Воробьева Е.А., Кадыгров Е.Н. Анализ межсезонных и межгодовых особенностей температурной стратификации городского острова тепла // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 552–557.
 6. Кадыгров Е.Н., Агапов Ю.В., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Тоцилкина Т.А., Троицкий А.В., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
 7. Хуторова О.Г., Тептин Г.М., Хуторов В.Е. Некоторые закономерности процессов синоптического и мезомасштаба в тропосфере, полученные с помощью сети приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 520–524.
 8. Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 705–713.
 9. Хуторова О.Г., Калинин В.В., Курбаналиев Т.Р. Вариации интегрального атмосферного влагосодержания, полученные по фазовым измерениям приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 529–533.
 10. Guochang X. GPS. Theory, algorithms, and applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
 11. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 308 с.
 12. Сервер Погода России: URL: <http://meteoinfospace.ru/>
 13. William H.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes in C. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 994 p.
 14. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 463 с.

V.E. Khutorov, O.G. Khutorova, G.M. Tep tin. **The urban heat island detection in space-time fluctuations of the electromagnetic wave refraction index.**

This paper considers decimeter radiowave propagation in the troposphere in urban environment. The structure function of tropospheric delay of GPS-GLONASS-derived decimeter radiowaves was analyzed. It was found that for radiopaths over the city, contribution to the dispersion of decimeter radiowave tropospheric delay is significantly different as compared to the contribution of non-urban radiopaths.