

А. Л. Коворотный, Ф. В. Кивва, Ю. В. Гончаренко, В. Н. Горобец, А. И. Горб*

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: kovorotniy@ire.kharkov.ua

**Навигационно-геодезический центр, Харьков, 61018, Украина*

E-mail: ngc@ngc.com.ua

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЛНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРОПОСФЕРЫ НАД ХАРЬКОВСКИМ РЕГИОНОМ ПОСРЕДСТВОМ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ

Одним из метеорологических параметров, оказывающих решающее влияние на распространение микроволн в атмосфере, является влажность и ее пространственно-временные распределения. В работе рассмотрены результаты измерения общего влагосодержания атмосферы над Харьковским регионом с помощью навигационной системы *GPS*, численно приведенные к количеству осаждаемой влаги в вертикальном столбе над приемником посредством различных моделей. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов по 10 тропосферным моделям в зависимости от различных погодных условий. Показано, что определенным преимуществом обладают две модели: *Saastamoinen* – для лета и *Hopfield* – для весеннего и осеннего периодов, что отражает региональные особенности тропосферы, связанные с особенностями циркуляции воздуха и температурным режимом. Использование оптимальной модели позволяет уменьшить ошибку определения влагосодержания в атмосфере в 3...5 раза. Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: атмосфера, глобальная спутниковая навигационная система, тропосферная задержка, прогнозирование, перманентная станция, осаждаемый водяной пар.

Одной из характеристик атмосферы, которая играет большую роль в формировании климата и водного режима суши, является содержание атмосферной влаги или водяного пара. Водяной пар, являясь основным поглотителем и рассеивателем солнечной и земной радиации, оказывает существенное влияние на тепловой режим земной поверхности и атмосферы. Фазовые состояния и переходы водяного пара формируют облака, аэрозоли, туманы, осадки, влияя на погоду и климат в целом, поэтому водяной пар в воздухе или влажность воздуха можно рассматривать как один из основных элементов погоды и индикаторов ее изменения.

В современной радиометеорологии нашли применение методы и средства, реализующие измерение основных параметров атмосферы: влажности, температуры, давления и др. [1–3]. Существует несколько методов и средств измерения параметров атмосферы, которые включают в себя контактные, использующие психрометры, рефрактометры [4] и дистанционные (метеолокация, *AERONET* (*Aerosol Robotic Network*), *GPS*-метеорология) [5–7]. Наряду с преимуществами каждый из них имеет свои недостатки: сложность проведения измерений (радиозондирование), высокая стоимость измерительной аппаратуры (лазерное и навигационное зондирование), ограниченность сети измерительных пунктов и т. д.

Альтернативой им могут служить доступные и недорогие методы, основанные на математическом моделировании параметров атмосферы. Одним из них является метод вычисления влажности атмосферы с использованием тропо-

сферных моделей, разработанных для оценки тропосферной задержки сигналов *GPS* по данным стандартных наземных метеорологических измерений [8].

В статье приведены результаты измерений полного влагосодержания тропосферы над Харьковом посредством *GPS*, а также их сравнение с результатами расчетов на 10 моделях в различные сезоны года и при различных метеорологических условиях.

1. Зенитная тропосферная задержка радиосигнала и влагосодержание атмосферы. Задержка распространения радиосигнала в нижних слоях атмосферы определяется с помощью зенитной тропосферной задержки (*Zenith Total Delay* (*ZTD*)) и проектирующей функции [9]. *ZTD* является одной из наиболее существенных поправок, которые учитываются при высокоточных геодезических расчетах по *GPS*-данным. Она представляет собой сумму «сухой» или гидро-статической (*Zenith Hydrostatic Delay* (*ZHD*)) и «влажной» (*Zenith Wet Delay* (*ZWD*)) составляющих [9]. Влажная составляющая зенитной тропосферной задержки, измеренная в единицах длины пути, может быть преобразована к общему содержанию водяного пара в вертикальном столбе атмосферы, выраженного толщиной слоя воды в миллиметрах, который образовался бы при конденсации и осадении всего количества водяного пара в этом столбе. Данный параметр определяет количество осаждаемого водяного пара или просто количество осаждаемой воды (*Precipitable Water Vapor* (*PWV*)) [10].

Зависимость, показывающая связь *PWV* с *ZWD*, приведена в работе [10]:

$$PWV = \pi(T_m) ZWD, \quad (1)$$

где

$$\pi(T_m) = \left[\rho_{lw} R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2' \right) \right]^{-1} \cdot 10^6; \quad (2)$$

ρ_{lw} – плотность воды $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$; R_v – удельная газовая постоянная для водяного пара, $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \right)$;

T_m – «взвешенное» значение температуры воздуха, К; k_2', k_3 – коэффициенты рефракции, равные $22,1 \pm 2,2 \left(\frac{\text{К}}{\text{мбар}} \right)$ и $(3,75 \pm 0,03) \cdot 10^5 \left(\frac{\text{К}^2}{\text{мбар}} \right)$ соответственно.

Значения параметра T_m определяются вертикальным распределением влажности и зависят от приземной температуры воздуха. На основе статистической обработки данных радиозондирования используется зависимость [11]

$$T_m = a + bT_k, \quad (3)$$

где a, b – коэффициенты линейной аппроксимации; T_k – приземная температура воздуха, К.

В настоящее время широко используются значения коэффициентов $a = 70,2$ и $b = 0,72$, которые получены по данным аэрологического зондирования над территорией США в диапазоне широт от 27 до 65° с.ш. [12]. Для других регионов земного шара коэффициенты аппроксимации могут иметь отличные значения [12]. В работе [13] показано, что влажная составляющая зенитной тропосферной задержки колеблется от нескольких миллиметров (в полярных областях) и нескольких сантиметров (в пустынях), до 40 см и более (в тропиках).

Способ ее определения с помощью навигационных приемников нашел широкое применение в мировой практике, но высокая стоимость измерительной аппаратуры и ограниченность сети измерительных пунктов требует разработки менее дорогих и доступных способов. Одним из таких способов является вычисление ZWD с помощью тропосферных моделей, основными исходными данными для которых являются приземная температура, давление, влажность.

Для определения значения ZWD разработано несколько моделей: *Hopfield*, *Saastamoinen*, *Niell*, *MOPS (Minimum Operational Performance Standards)* и др. [14]. Они различаются по принятым исходным предположениям, касающимся распределения давления, температуры и влажности на различных высотах. В 1970-е гг. разработаны две базовые модели тропосферной задержки: *Hopfield* и *Saastamoinen*. Модель *Hopfield* основана на связи между показателями преломления на

высоте H и у земной поверхности, которые выведены эмпирически [15].

$$D_w^z = \frac{(k_3 + 273(k_2 - k_1)) e_s}{10^6 T_s} \int_{h_s}^{h_w} \left[\frac{h_w - h}{h_w - h_s} \right]^4 dh, \quad (4)$$

где k_1, k_2', k_3 – коэффициенты рефракции; e_s – давление водяного пара; T_s – абсолютная температура; h_s, h_w – высота приемника и влажной тропосферы над геоидом соответственно.

Модель *Saastamoinen* разработана с использованием газовых законов.

$$D_w^z = \left[\left(k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_w} \right) \frac{R_d}{v_g} + \frac{k_3}{T_s} \left(\frac{R_d}{v_g - \alpha R_d} \right) \right] \frac{e_s}{10^{-6}}, \quad (5)$$

где R_d – универсальная газовая постоянная для сухого воздуха; R_w – универсальная газовая постоянная водяного пара; α – градиент температуры; v – численный коэффициент; g – ускорение гравитационного притяжения.

Большинство остальных моделей являются модификациями моделей *Hopfield* и *Saastamoinen* и отличаются в основном параметрами, которые входят в эмпирические формулы. Эти параметры отражают сезонные и географические особенности, свойственные рассматриваемым регионам.

Применимость каждой из этих моделей во многом зависит от климатических и географических условий. Так, например, в средних широтах (станции Прага и Вена) и в экваториальной зоне (станция Сингапур) величина ZWD , рассчитанная по модели *Saastamoinen*, хорошо согласуется с данными *GPS*-измерений, тогда как в полярных регионах, особенно в Арктике, наблюдается слабое совпадение модельных и измеренных результатов [14].

В тропосферных моделях для расчета ZWD используются такие параметры, как λ – градиент концентрации водяного пара, U_s – относительная влажность, H – высота над уровнем моря, T_m – «взвешенное» значение температуры воздуха. Перечень этих параметров приведен в табл. 1.

Особенность расчета PWV (формула (1)) с использованием модельных представлений состоит в том, что на основании данных контактных метеорологических измерений в точке приема производится прогнозирование метеоусловий на различных высотах и расстояниях от точки приема. Поэтому точность такого прогноза во многом зависит от используемой модели.

Для минимизации систематической ошибки, которую вносят в результаты измерений особенности модели, проведен сравнительный анализ результатов расчетов, использующих различные тропосферные модели, с результатами,

полученными с помощью более точных методов, использующих данные *GPS* или *AERONET*.

Таблица 1

Входные параметры, используемые для расчета *ZWD*

Модель	e_s	T_s	α	λ	U_s	H	T_m	Другие
<i>Hopfield</i>	+	+				+		
<i>Saastamoinen</i>	+	+						
<i>Callahan</i>	+	+						
<i>Chao</i>	+	+	+					
<i>Berman</i>		+	+		+			
<i>Askne and Nordius</i>	+		+	+		+	+	g_m, φ
<i>Ifadis</i>	+	+						P_s
<i>Baby</i>		+			+			γ, ν
<i>MOPS</i>	+	+		+		+		β
<i>Mendes Wet Delay</i>	+	+		+				g_m, β

Среди всех методов, позволяющих определять влагосодержание атмосферы, наиболее точным является *AERONET*. Он основан на измерении прямого и рассеянного солнечного излучения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра с помощью солнечных фотометров. Сеть *AERONET* включает в себя более 200 станций наблюдений, распределенных по всему земному шару. Данные измерений этой сети позволяют осуществлять долговременные исследования оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля. Недостатками этой системы являются высокая стоимость оборудования и невозможность получения данных в условиях полной облачности. Сравнительный анализ, проведенный в работе [16], показывает хорошее совпадение между значениями *ZWD*, измеренными с помощью *GPS*, и значениями *PWV*, рассчитанными с помощью *AERONET* (рис. 1). Наши исследования проводились в течение июня 2009 г.

Сравнение двух методов измерения влагосодержания атмосферы было проведено для разных сезонов. В анализе принимались данные за сентябрь 2008 г. и январь, апрель, июнь 2009 г. Хорошая связь осажденной воды (*AERONET*) и «влажной» компоненты тропосферной задержки (*ZWD*) в зависимости от времени года показана на рис. 2. Из графика видно, что и в другие месяцы наблюдается хорошая корреляция данных *GPS* и *AERONET*. Это позволяет в дальнейшем для сравнительного анализа применимости различных тропосферных моделей использовать данные *GPS*.

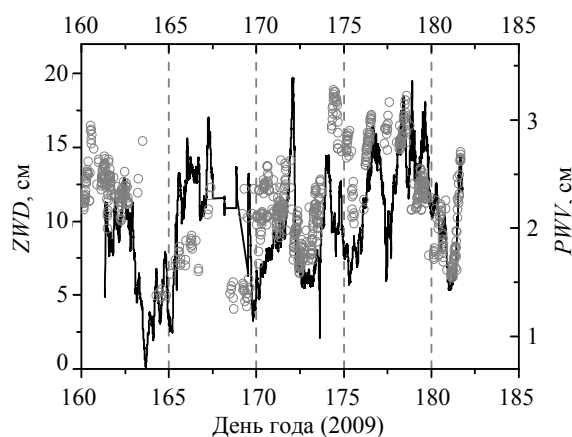


Рис. 1. Изменение *ZWD* и *PWV* в течение июня 2009 г.: измеренные с помощью *GPS* (—) и *AERONET*(○) соответственно

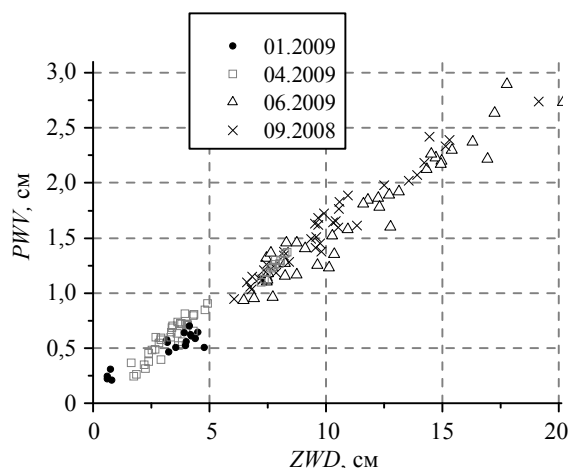


Рис. 2. Сезонные зависимости *ZWD* и *PWV* по данным измерений *GPS* и *AERONET* соответственно

2. Результаты измерений. В соответствии с принятой методикой эксперимента по данным *GPS*-наблюдений региональной системы высокоточных спутниковых геодезических измерений в Харьковской области (*NGCNET*) вычислялись значения полного влагосодержания атмосферы (*PWV*). Эти значения получены на основании «сырых» данных измерений по методике, описанной в работе [17].

На рис. 3 приведен временной ход величины *PWV*, рассчитанной по данным спутниковых наблюдений (кривая 1) и по тропосферным моделям *Hopfield*, *Saastamoinen*, *Baby* и *Neill* (кривые 2–5 соответственно) в течение июля 2012 г. для Харьковского региона. Средняя температура за июль составила 23,6 °С при значениях атмосферного давления 745,9 мм рт. ст. и средней относительной влажности 58,8 %. Рисунок иллюстрирует разброс значений между моделями, что говорит о необходимости выбора оптимальной модели при расчете влагосодержания атмосферы для конкретного региона.

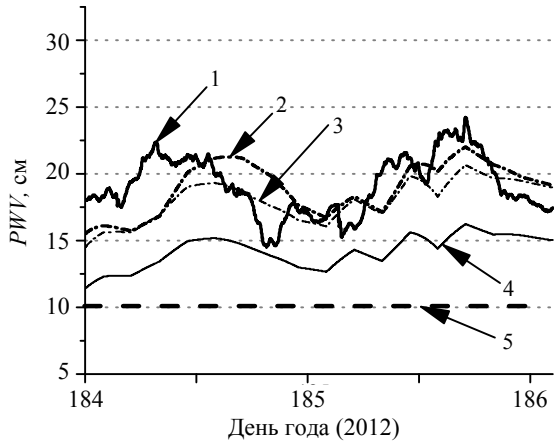


Рис. 3. Временной ход величины PWV за июль 2012 г.: 1 – GPS; 2 – Saastamoinen; 3 – Hopfield; 4 – Baby; 5 – Neill

На следующем этапе исследований проведены численные расчеты средних значений и среднеквадратического отклонения ошибки PWV между измеренными с помощью GPS и вычисленными с использованием тропосферных моделей. Оценка проведена по 10 наиболее распространенным моделям тропосферной задержки: Hopfield, Callahan, Chao, Berman, Askne and Nordius, Ifadis, Baby, MOPS, Mendes Wet Delay model. В табл. 2 приведены результаты численных расчетов отклонений значений PWV . Измерения проводились на протяжении 2012 и 2013 г. метеорологической станцией сети METAR (UKHH – 49°55' с.ш., 36°17' в.д.) и референционной GPS-станцией в Харьковской области (KHBA – 50°02' с.ш., 36°14' в.д.).

Таблица 2

Статистическая оценка ошибок

Модели	Зима		Весна		Лето		Осень	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
Hopfield	0,89	0,82	-0,09	2,22	1,01	3,41	-0,05	2,49
Saastamoinen	1,84	0,79	1,18	2,20	0,01	3,16	0,37	2,34
Callahan	0,79	0,87	-0,76	2,33	-3,40	3,52	-2,57	2,46
Chao	2,13	0,80	0,73	2,42	-4,13	4,27	-1,98	2,75
Berman	1,90	0,80	1,06	2,23	-1,90	3,25	-0,59	2,34
Askne and Nordius	1,58	0,81	0,64	2,24	-1,35	3,26	-0,64	2,35
Ifadis	-0,43	0,81	-0,96	2,19	-1,92	3,11	-1,66	2,33
Baby	2,13	1,19	0,78	2,24	4,34	3,26	2,45	2,61
MOPS	1,50	0,81	0,47	2,25	-1,75	3,29	-0,94	2,36
Mendes Wet Delay	2,11	0,79	1,70	2,19	0,38	3,08	0,93	2,32

На рис. 4 показано изменение ошибки в зависимости от влажности за период 2012 (январь, март, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь) и 2013 г. (май, июнь, июль, август, сентябрь). Статистическую обеспеченность результатов измерений, где по оси ординат отложены величины, соответствующие вероятности

появления измерения с заданным результатом влажности, иллюстрирует рис. 5. Как следует из рис. 4 и 5, в интервале влажностей 8...18 г/м³ (пунктирная линия на рис. 4), который является наиболее статистически обеспеченным, наименьшую ошибку дает модель Saastamoinen. Этот период соответствует сухой и теплой погоде.

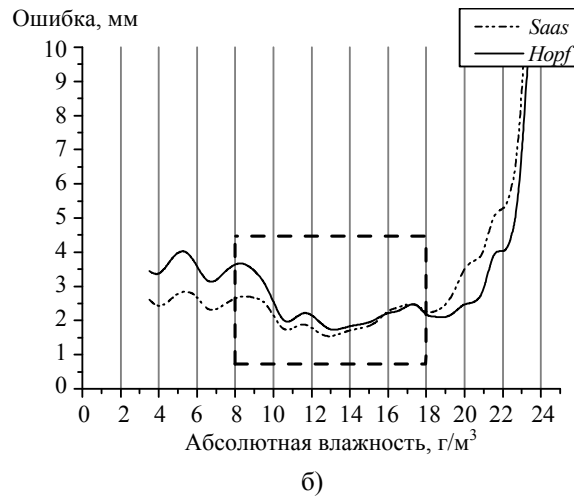
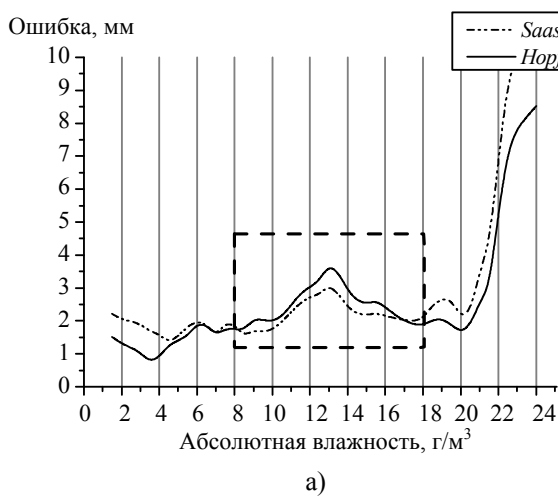


Рис. 4. Ошибка измерения полного влагосодержания атмосферы для 2012 г. (а) и 2013 г. (б)

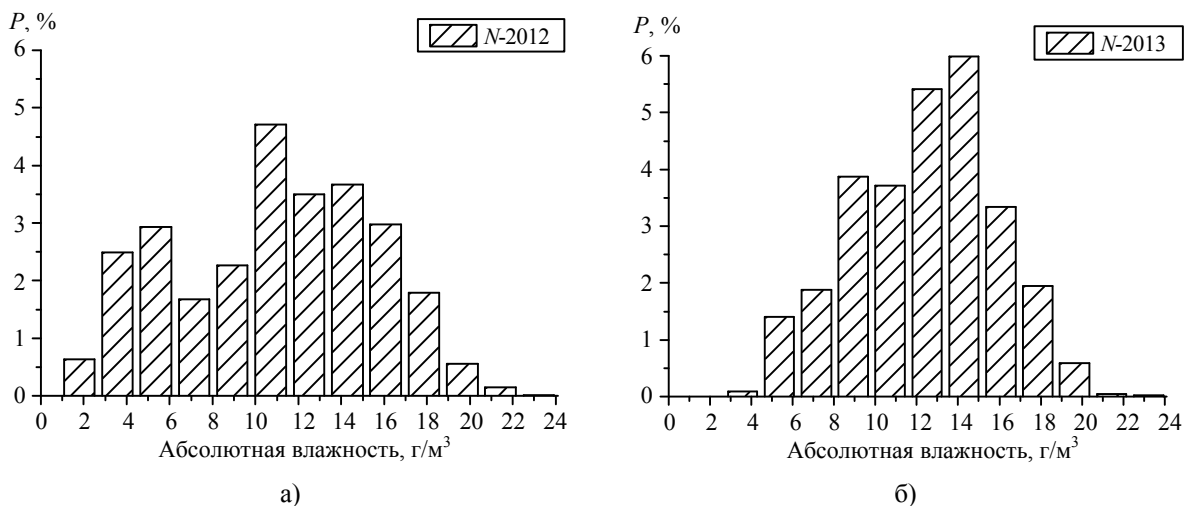


Рис. 5. Статистическая обеспеченность результатов: а) – 2012 г., б) – 2013 г.

Отметим, что интервал с низкой влажностью ($0...8 \text{ г/м}^3$), который соответствует сухой и холодной погоде, и интервал с высокой влажностью ($18...24 \text{ г/м}^3$), который соответствует влажной и теплой погоде (обычно летним грозовым осадкам), статистически менее обеспечены. Судя по тенденциям можно сделать вывод, что при низкой влажности меньшую ошибку дает модель *Saasta-moinen*, а в период повышенной влажности – модель *Hopfield*.

Выводы. Показано, что для Харьковско-го региона в летний период минимальные ошибки дает модель *Saastamoinena*, а в весенний и осенний периоды – модель *Hopfield*.

По результатам работы можно сделать выводы, что при сухой и теплой погоде (абсолютная влажность находится в интервале $8...18 \text{ г/м}^3$) наименьшую ошибку дает модель *Saastamoinen*. При высокой влажности (интервал влажности $18...24 \text{ г/м}^3$) лучший результат показала модель *Hopfield*.

Выбор оптимальной модели для конкретного региона позволяет уменьшить ошибку определения влагосодержания в атмосфере в 3..5 раза.

Библиографический список

1. *Радиометеорология* / под ред. Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон; пер. с англ. под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 392 с.
2. *Методы метеорологических измерений: методы зондирования атмосферы: учеб. пособие* / под ред. Л. Г. Качури. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 456 с.
3. *Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности: учеб.-метод. пособие* / Ю. М. Тимофеев. – СПб., 2009. – 129 с.
4. *Kämpfer N. Monitoring Atmospheric Water Vapour / N. Kämpfer // ISSI Scientific Report Series. – 2013. – Vol. 10. – 326 p.*
5. *Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов* / В. С. Ефре-

- мов, Б. М. Вовшин, И. С. Вылегжанин и др. // Журн. радиоэлектрон. – 2009. – № 10. – 10 с.
6. *AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization* / B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker et al. // *Remote sensing of environment.* – 66. Iss. 1. – 1998. – P. 1–16.
7. *Paroscientific, Inc. / GPS meteorology* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.paroscientific.com/gpsmet.htm>. – Дата доступа: 27.10.12. – Загл. с экрана.
8. *Hordyniec P. Modeling zenith delays and integrated water vapour* / P. Hordyniec // *Geodesy.* – 2014. – 6. – P. 1–7.
9. *Spilker Jr. J.J. Tropospheric Effects on GPS, Global Positioning System, Theory and Applications* / Jr. J.J. Spilker // *American Institute of Aeronautics and Astronautics.* – Washington, 1996. – Vol. 1. – P. 517–546.
10. *Schüler T. On ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation: Ph.D. dissertation* / T. Schüler. – Munich: Universität der Bundeswehr, 2001. – 364 p.
11. *Davis J. L. Atmospheric propagation effects on radio interferometry* / J. L. Davis // *AFGL Technical Report 86-0243, U.S. Air Force Geophysics Laboratory.* – Hanscom AFB, Massachusetts, 1986. – 276 p.
12. *GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System* / M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring et al. // *J. Geophys. Research: Atmospheres.* – 1992. – 97, Iss. D14. – P. 15787–15801.
13. *Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС-сигналами* / В. В. Чукин, Е. С. Алдошкина, А. В. Вахнин и др. – СПб.: Монография, 2004. – 107 с.
14. *Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии* / К. М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – Т. 1. – 334 с.
15. *Заблоцкий Ф. Д. Визначення і оцінка складових тропосферної затримки у GPS вимірах* / Ф. Д. Заблоцкий // *Геодезія, картографія і аерофотозімання.* – 2001. – Вип. 61. – С. 11–23.
16. *Мицишина И. И. Определение влагосодержания тропосферы в условиях Киева по задержке радиосигналов навигационных систем* / И. И. Мицишина, Ю. В. Гончаренко, Г. П. Милиневский // *Междунар. науч. конф. «Астрономия и физика космоса в Киевском университете».* – К., 2013.
17. *Мониторинг атмосферы над харьковским регионом посредством GPS* / А. Л. Коворотный, Ю. В. Гончаренко, В. Н. Горобец и др. // *Радиофизика и электрон.* – 2013. – 4(18), № 1. – С. 59–64.

Рукопись поступила 10.06.2014.

A. L. Kovorotniy, Y. V. Goncharenko,
V. N. Gorobets, F. V. Kivva,
A. I. Gorb, A. Y. Balan

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELS
FOR ESTIMATION OF THE TOTAL MOISTURE
CONTENT OF THE TROPOSPHERE THROUGH
THE GPS MEASUREMENTS OVER KHARKOV

The humidity and its space-time distribution is one of the meteorological parameters having impact on the micro wave propagation in the atmosphere. The results of measurements of the moisture content of troposphere by navigation satellite system of *GPS* over the Kharkov region are presented in the paper. Those results are evaluated on the basis of precipitated water values in vertical column above the receiver obtained by different models. The comparison of the results of 10 different tropospheric models at different weather conditions is provided in the paper. Two models have certain advantages – *Saastamoinen* for summer and *Hopfield* for spring and autumn periods, which reflect some regional characteristics of the troposphere associated with the characteristics of air circulation and temperature control. Using the optimal model for the *PWV* prediction allows to decrease the estimation error of the total water content determination in 3...5 times.

Key words: atmosphere, global navigation satellite system, tropospheric delay, forecasting, permanent station, perceptible water vapor.

О. Л. Коворотний, Ю. В. Гончаренко,
В. М. Горобець, Ф. В. Ківва,
А. І. Горб, А. Ю. Балан

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ОЦІНКИ ПОВНОГО ВМІСТУ ВОЛОГИ
ТРОПОСФЕРИ НАД ХАРКІВСЬКИМ РЕГІОНОМ
ЗА ДОПОМОГОЮ *GPS*-ВИМІРЮВАНЬ

Одним із метеорологічних параметрів, що безпосередньо впливають на поширення мікрохвиль в атмосфері, є вологість та її просторово-часовий розподіл. У роботі розглянуто результати вимірювання загального вмісту вологи атмосфери над Харківським регіоном за допомогою навігаційної системи *GPS*, що чисельно наведені до кількості осадженої вологи у вертикальному стовпі над приймачем по різних моделям. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків по 10 тропосферним моделям залежно від різних погодних умов. Показано, що певні переваги мають дві моделі: *Saastamoinen* – для літа та *Hopfield* – для весняного та осіннього періодів, що відображає регіональні особливості тропосфери, пов'язані з особливостями циркуляції повітря і температурним режимом. Використання оптимальної моделі дозволяє зменшити помилку визначення вмісту вологи в атмосфері у 3...5 рази.

Ключові слова: атмосфера, глобальна супутникова навігаційна система, тропосферна затримка, прогнозування, перманентна станція, осаджена водяна пара.