

УДК 528.28:629.783

Б. Б. ПАЛЯНИЦЯ, В. Р. ОЛІЙНИК, В. М. БОЙКО

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, ел. пошта: pal-bb@ukr.net, oliynyk5561@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ РІЧНИХ ЗМІН ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ ЗА ДАНИМИ УКРАЇНСЬКИХ МЕТЕОСТАНЦІЙ

Мета. Метою дослідження у цій роботі є визначення складових зенітної тропосферної затримки для різних станцій на території України та порівняння їх між собою. **Методика.** Під час визначення тропосферної затримки її отримують як суму сухої та вологої складових. Розрахунки складових зенітної тропосферної затримки проводилися інтегральним методом за даними аерологічного зондування атмосфери. Оскільки суха складова є більш прогнозованою, то важливо було встановити вплив вологої складової на сумарну поправку, яка є чутливішою до зміни метеорологічних параметрів. **Результати.** Для обчислення складових тропосферної затримки використано дані аерологічного зондування атмосфери, отримані на території України, зокрема на метеорологічних станціях Львів, Київ, Одеса і Харків протягом 2015 року. Ці дані доповнювалися до верхньої границі нейтральної атмосфери даними Стандартної моделі атмосфери (СМА-81). На основі отриманих атмосферних профілів проводилися обчислення сухої та вологої складових зенітної тропосферної затримки. У результаті обчислень отримано графіки зміни величин сухої та вологої складових, що дають змогу порівняти особливості та характер цих змін протягом річного періоду на різних станціях. **Наукова новизна.** Сьогодні дослідження зміни тропосферної затримки у результаті ГНСС-вимірів залишається актуальним, оскільки пов'язане із питанням точнішого врахування впливу тропосфери на супутникові виміри, а відповідно й на підвищення точності визначення координат пунктів на поверхні Землі. Актуальність роботи полягає у тому, що сьогодні остаточно ще не сформульований цілісний підхід до врахування регіональних кліматичних особливостей чи то станів тропосфери і відповідного їхнього врахування під час обчислення величини затримки. **Практична значущість.** Отримані результати можуть бути використані для побудови регіональних моделей зміни тропосферної затримки, а також для прогнозування впливу тропосфери на ГНСС-виміри. Побудовані графіки зміни значень зенітної тропосферної затримки дали можливість оцінити її зміну протягом річного періоду, а також порівняти значення на різних станціях.

Ключові слова: вплив тропосфери; тропосферна затримка; інтегральний метод визначення тропосферної затримки; ГНСС-виміри.

Вступ

Сьогодні дослідження зміни тропосферної затримки у результаті ГНСС-вимірів залишається актуальним, оскільки пов'язане із питанням точнішого врахування впливу тропосфери на супутникові виміри, а відповідно й на підвищення точності визначення координат пунктів на поверхні Землі. Цю тему висвітлювали як зарубіжні [Saastamoinen, 1972; Mendes, Langley, 1994; Niell, 1996; Ifadis, 2006; et al.], так і українські вчені [Заблоцький, 2000, 2001, 2006, 2010; Каблак, 2013 та ін.]

Актуальність роботи полягає у тому, що сьогодні остаточно ще не сформульований цілісний підхід до врахування регіональних кліматичних особливостей чи то станів тропосфери і відповідного їхнього врахування під час обчислення величини затримки.

Мета

Мета дослідження – визначення складових зенітної тропосферної затримки для різних станцій на території України, виявлення особливостей зміни відповідних складових та порівняння їх між собою.

Методика

Як відомо, тропосфера – це нижня, неіонізована частина земної атмосфери, що розташована між земною поверхнею і тропопаузою, характеризується зниженням температури повітря з висотою у середньому на – 6,5 °С на 1 кілометр.

При використанні біекспоненційної моделі атмосфери тропосферну затримку розділяють на суху (гідростатичну) d_h^z та вологу (негідростатичну) d_w^z складові і розглядають як добуток значення за-

тримки у зеніті ($Z=0^\circ$) на функцію відображення $m(Z)$ (mapping function), обчислену для відповідного значення зенітної відстані Z [Паляниця, 2010]:

$$d_{trop} = d_h^z \cdot m_h(z) + d_w^z \cdot m_w(z), \quad (1)$$

де d_h^z і d_w^z – гідростатична (суха) і волога складові зенітної тропосферної затримки.

Тропосферна затримка визначається переважно через індекс показника заломлення повітря:

$$d_h^z = 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} N_h dH + 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} N_w dH, \quad (2)$$

де N_h і N_w – індекси показника заломлення повітря для гідростатичної (сухої) та негідростатичної (вологої) складової зенітної тропосферної затримки; N_s – початкова висота вертикального профілю індексу показника заломлення; N_a – задана верхня границя інтегрування атмосфери; dH – прошарок висоти.

Основною формулою для визначення індексу показника заломлення для радіохвиль є формула Ессена-Фрума. Індекс показника заломлення повітря є функцією температури повітря t , атмосферного тиску P і парціального тиску водяної пари e [Mendes, 1999; Заблоцький, 2000]:

$$N = K_1 \frac{p-e}{T} + K_2 \frac{e}{T} K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (3)$$

де K_1 , K_2 , K_3 – емпіричні коефіцієнти: $K_1=77,624$ (К/гПа), $K_2=64,7$ (К/гПа), $K_3=3,719$ ($105\text{K}^2/\text{гПа}$).

Перший член формули не залежить від вмісту водяної пари в атмосфері і тому його називають сухою складовою, а суму другого і третього членів – вологою складовою індексу показника заломлення повітря.

Вибір даних і процес обчислення

На території України є шість постійно діючих метеостанцій: у Львові (UKLL), Києві (UKKK), Ужгороді (33658), Одесі (UKOO), Харкові (UKHN), Кривому Розі (33791). Для дослідження використовувалися дані чотирьох із них, а саме: станцій Львова, Києва, Одеси та Харкова, накопичені в період з 1 січня по 31 грудня 2015 року. Через нерівномірність збору метеорологічних даних були взяті для розрахунків по 10 зондувань на кожний місяць. Усі зондування, які взяті до опрацювання, отримані на 0^h по UTC. Усього було підібрано 480 профілів зондувань по 120 з кожної станції, по 10 – на кожен місяць 2015 року.

Дані зондування завантажували з Інтернет-ресурсу Служби атмосферних досліджень при університеті Вайомінга (Канада) [<http://weather.uwo.edu/upperair/sounding.html>]. Профілі зондувань доповнювалися до висоти 100 км даними Стандартної моделі атмосфери (СМА-81).

На основі цих даних проводилися обчислення сухої та вологої складових зенітної тропосферної затримки інтегральним методом [Паляниця, 1999].

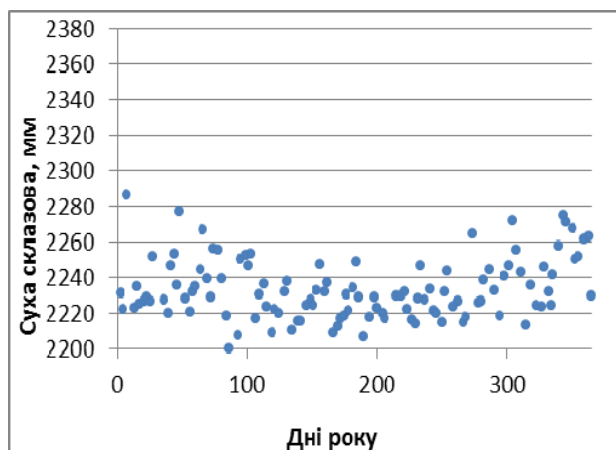


Рис. 1. Значення сухої складової на ст. Львів
Fig. 1. The value of the dry component in the station Lviv

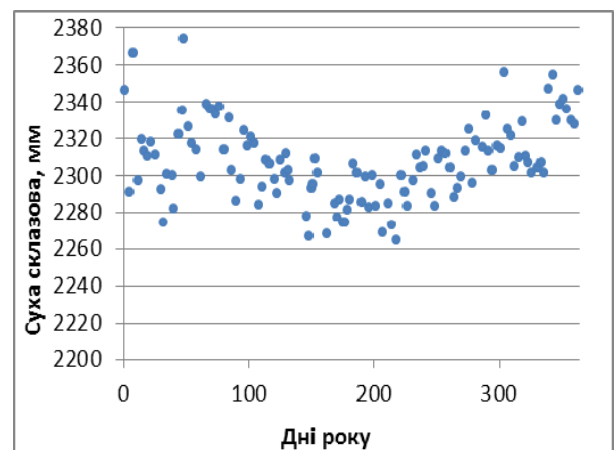


Рис. 2. Значення сухої складової на ст. Одеса
Fig. 2. The value of the dry component in the station Odessa

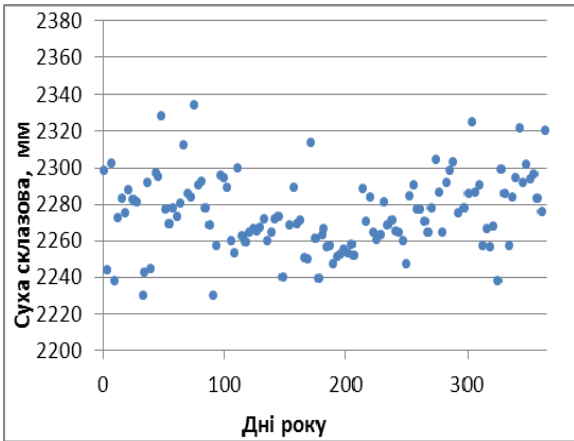


Рис. 3. Значення сухої складової на ст. Київ
Fig. 3. The value of the dry component in the station Kyiv

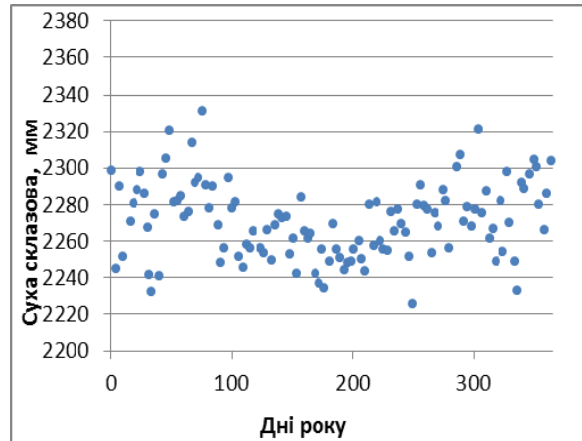


Рис. 4. Значення сухої складової на ст. Харків
Fig. 4. The value of the dry component in the station Kharkiv

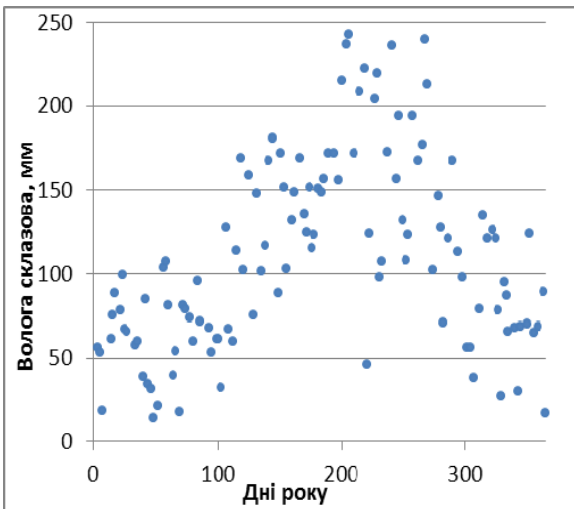


Рис. 5. Значення вологої складової на ст. Львів
Fig. 5. The value of the wet component in the station Lviv

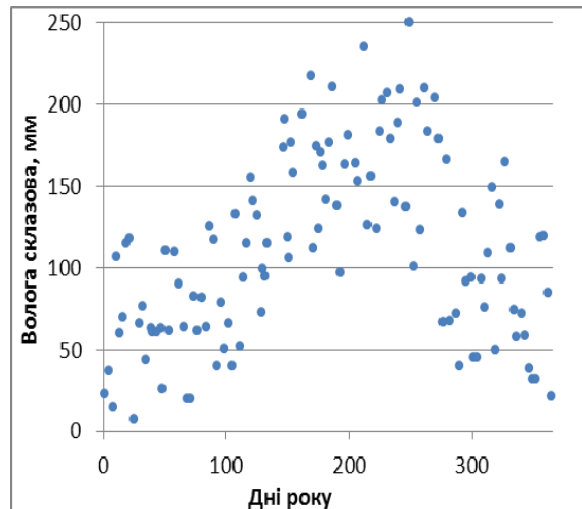


Рис. 6. Значення вологої складової на ст. Одеса
Fig. 6. The value of the wet component in the station Odessa

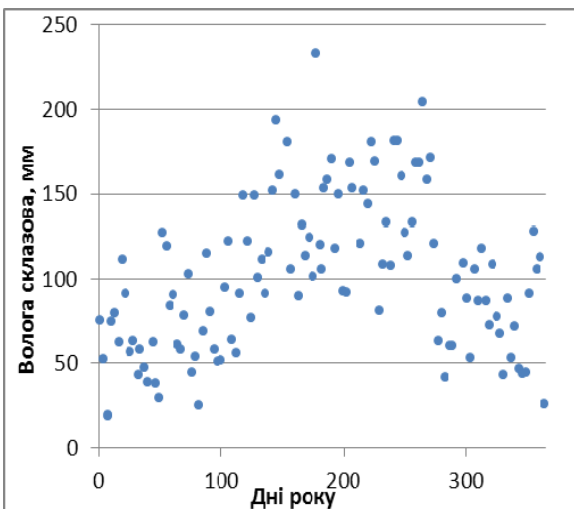


Рис. 7. Значення вологої складової на ст. Київ
Fig. 7. The value of the wet component in the station Kyiv

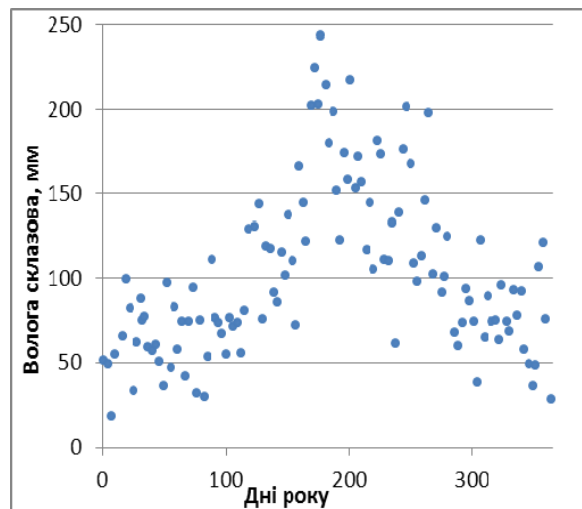


Рис. 8. Значення вологої складової на ст. Харків
Fig. 8. The value of the wet component in the station Kharkiv

Екстремальні та середньорічні значення складових
Extremal and average annual values of components

Назва станції (висота, м)	Значення сухої складової, мм			Значення вологої складової, мм		
	максимальні	мінімальні	середні	максимальні	мінімальні	середні
Львів (323 м)	2286,9	2185,0	2232,5	243,0	13,7	109,6
Київ (167 м)	2334,2	2229,7	2275,0	233,3	19,1	101,4
Одеса (42 м)	2373,7	2265,0	2307,4	260,3	7,0	113,2
Харків (155 м)	2330,8	2225,8	2225,8	243,9	18,7	101,7

Аналізуючи розподіл величин складових зенітної тропосферної затримки (рис. 1–8), можна зауважити, що:

- суха складова у зимовий період має більші значення, ніж у літній, а волога, – навпаки;
- відносна зміна сухої складової протягом річного періоду є меншою, ніж вологої;
- для вологої складової більше властивий річний характер зміни;
- загалом у літній період волога складова більша за значенням, ніж у зимовий.

Як бачимо з таблиці:

- максимальні значення і сухої складової (2374 мм), і вологої (260 мм) спостерігалися в Одесі, відповідно мінімальні значення для сухої складової (2185 мм) зафіксовані у Львові, а вологої (7 мм) – в Одесі;

- середньорічні значення і сухої складової (2307 мм), і вологої (113 мм) в Одесі були більшими, ніж на інших станціях, відповідно мінімальні значення для середньорічних значень сухої складової (2232 мм) зафіксовані у Львові, а вологої (101 мм) – у Києві;

- амплітуда зміни сухої складової за використаними даними найменша на станції Львів (102 мм), а найбільша – на ст. Одеса (109 мм), для вологої складової – найменша на ст. Київ (214 мм), а найбільша – на ст. Одеса (253 мм);

- доволі близькими виявилися середні значення вологих складових на станціях Київ і Харків, різниця становить всього 0,3 мм, хоча усереднення проводилося за ста двадцятьма профілями на кожній станції, отриманими із зондування і доповненими даними СМА.

Надалі, для порівняння характеру зміни складових, отриманих на різних пунктах, обчислено середньомісячні значення складових (рис. 9).

Як бачимо з графіків (рис. 9), на усіх станціях значення сухої складової є більшими у зимовий період.

Якщо порівняти розбіжності величин сухих складових, обчислених на різних станціях, із висотами цих станцій, то між ними існує обернена пропорційна залежність: чим більша висота станції, тим значення сухої складової зенітної тропосферної затримки будуть меншими, і навпаки.

Стосовно графіків зміни вологої складової, то, порівнюючи із зміною сухої складової, більші значення спостерігаються у літній період, коли більшими є значення температури і парціального тиску. Крім того, як бачимо з графіка, у літній період розбіжності величин середньомісячних значень вологої складової значно більші, ніж в інші періоди року, особливо зимовий і весняний. Не простежується чіткої залежності величини вологої складової від висоти станції, яка характерна для сухої складової.

Наступне дослідження річних змін складових зенітної тропосферної затримки полягало у порівнянні внеску вологої складової у загальну величину затримки. Для цього були побудовані такі графіки, у яких по осі ординат відкладені значення складових, а по осі абсцис – місяці року (рис. 11–14).

Із графіків (рис. 11–14) бачимо внесок вологої складової у величину сумарної поправки. У літній період цей внесок є значно вагомим, ніж у зимовий.

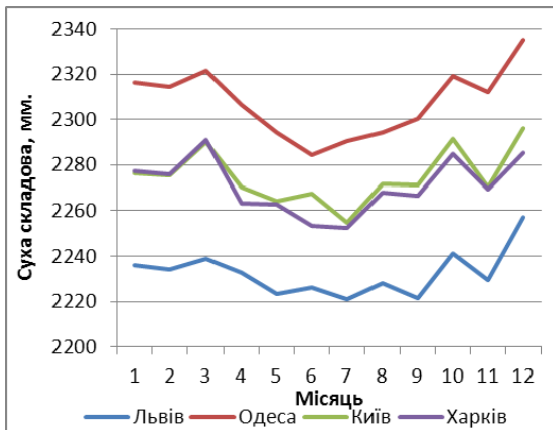


Рис. 9. Графік середньомісячних значень сухої складової зенітної тропосферної затримки
 Fig. 9. Graph of monthly average values of the dry component zenith troposphere delay

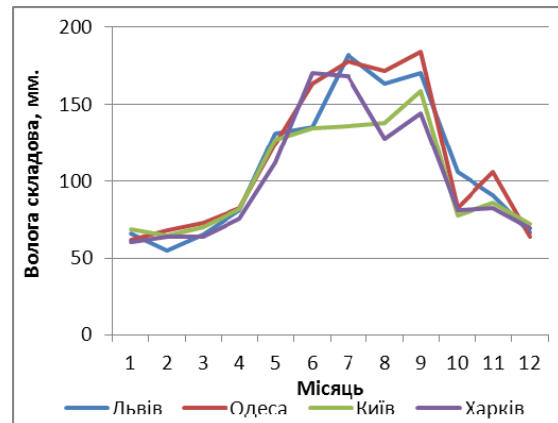


Рис. 10. Графік середньомісячних значень вологої складової зенітної тропосферної затримки
 Fig. 10. Graph of monthly average values of the wet component zenith troposphere delay

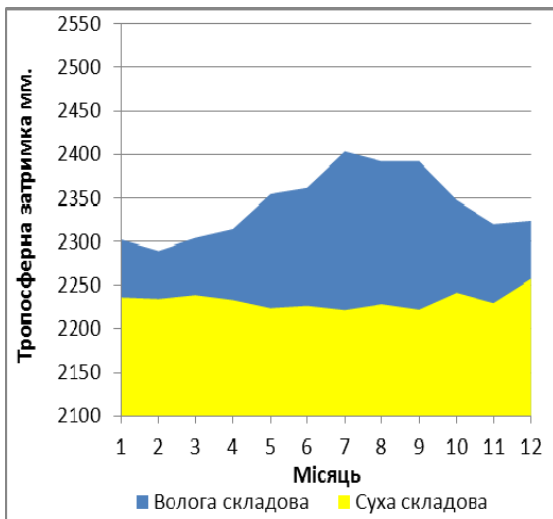


Рис. 11. Внесок вологої складової у формування величини тропосферної затримки на ст. Львів
 Fig. 11. The contribution of wet component of the formation of values troposphere delays in the station Lviv

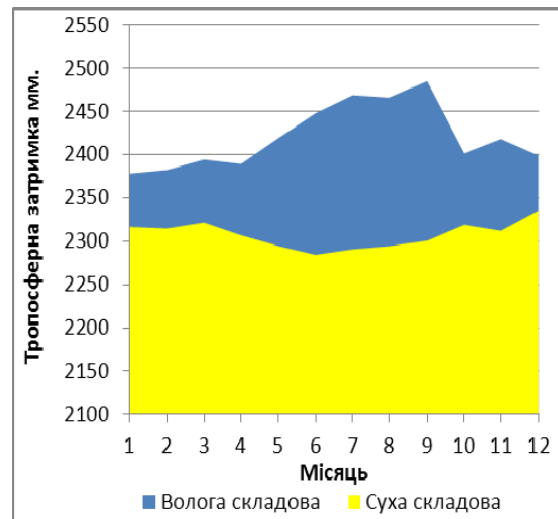


Рис. 12. Внесок вологої складової у формування величини тропосферної затримки на ст. Одеса
 Fig. 12. The contribution of wet component of the formation of values troposphere delays in the station Odessa

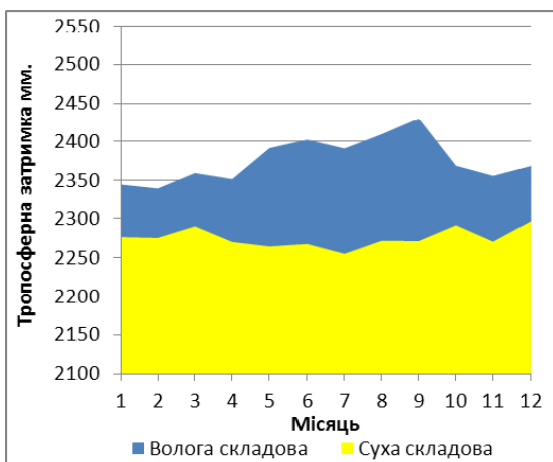


Рис. 13. Внесок вологої складової у формування величини тропосферної затримки на ст. Київ
 Fig. 13. The contribution of wet component of the formation of values troposphere delays in the station Kyiv

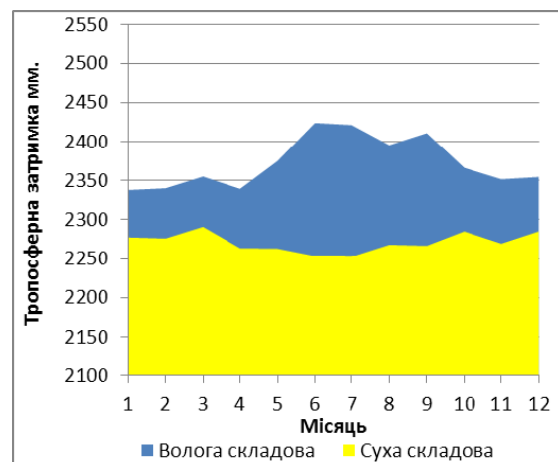


Рис. 14. Внесок вологої складової у формування величини тропосферної затримки на ст. Харків
 Fig. 14. The contribution of wet component of the formation of values troposphere delays in the station Kharkiv

Наукова новизна і практична значущість

Отримані результати можуть бути використані у подальшому для побудови регіональних моделей зміни тропосферної затримки, а також для прогнозування впливу тропосфери на ГНСС-виміри.

Висновки

Із аналізу отриманих результатів зроблено такі висновки:

- величини середньорічних значень сухої складової зенітної тропосферної затримки корелюють із висотами відповідних станцій, чого не можна сказати про вологу складову;
- стосовно вологої складової, то більші її значення спостерігаються у літній період, що не характерно для сухої складової;
- загалом вологій складовій притаманний чітко виражений річний характер зміни;
- внесок вологої складової у величину сумарної поправки у літній період є значно вагоміший, ніж у зимовий, особливо в регіонах, де характерна наявність більшої кількості водяної пари у нижніх шарах тропосфери.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Заблоцький Ф. Д. До вибору моделей визначення складових зенітної тропосферної затримки при геодинамічних дослідженнях / Ф. Д. Заблоцький // Геодинаміка. – Львів, 2000. – № 1(3). – С. 1–7.
- Заблоцький Ф. Д. Визначення і оцінка складових тропосферної затримки у GPS-вимірах / Ф. Д. Заблоцький // Геодезія, картографія і аерофотознімання, 2001. – Вип. 61. – С. 11–23.
- Заблоцький Ф. Д. Особливості формування тропосферної затримки в Антарктиді (за даними станції Мак–Мердо) / Ф. Д. Заблоцький, Н. Р. Довган, Б. Б. Паляниця // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2006. – С. 115–119.
- Заблоцький Ф. Д. Аналіз зенітної тропосферної затримки в тихоокеанських тропічних широтах / Ф. Д. Заблоцький, О. Ф. Заблоцька // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2010. – Вип. 1(19). – С. 50–55.
- Каблак Н. Методика визначення впливу тропосфери на результати GNSS-вимірювань в мережі активних референціальних станцій / Н. Каблак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2013. – Вип. 1(25). – С. 62–66.
- Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д. Порівняння вологої складової зенітної тропосферної затримки виведеної із GNSS-вимірювань, з відповідною величиною із радіозондування / М. В. Пазяк, Ф. Д. Заблоцький // Геодезія, картографія і аерофотознімання, 2015. – Вип. 81. – С. 16–24.
- Паляниця Б. Особливості зміни атмосферних поправок у супутникові віддалемірні виміри / Б. Паляниця // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 1999. – Вип. 59. – С. 27–29.
- Паляниця Б. Дослідження аналітичних моделей тропосферної затримки / Б. Паляниця // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2010. – Вип. 1(19). – С. 120–122.
- Служба атмосферних досліджень при університеті Вайомінга, Інтернет ресурс [Режим доступу]: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Турчин Н. Сучасні підходи до визначення тропосферної затримки та її складових / Н. Турчин, Ф. Заблоцький // Геодезія, картографія і аерофотознімання/ – 2015. – Вип. 78. – С. 155–159.
- Ifadis I. M., Katsoungiannopoulos S., Pikridas C., Rossikopoulos D., and Fotiou A. Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radio-sonde Measurements and Permanent GPS Data. PS5.4 – GNSS Processing and Applications, XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8–13, 2006. – P. 15.
- Mendes V. B., Langley R. B., A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data. Paper presented at KIS94, International Symposium on Kinematic System in Geodesy, Geomatics on Navigation, Banff, Canada, August 30 – September 2, 1994, 12 pp.
- Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques // Ph. D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report № 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999. – 353 pp.
- Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. "Journal of Geophysical Research". – 1996. – Vol. 101. – № B2. – Pp. 3227–3246.
- Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysics. Monogr. Ser., Vol.15, AGU, Washington, D.C., 1972. – P. 247–251.

Б. Б. ПАЛЯНИЦЯ, В. Р. ОЛІЙНИК, В. М. БОЙКО

Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет "Львовская политехника", ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, эл. почта: pal-bb@ukr.net, oliynyk5561@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЗЕНИТНОЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ ПО ДАННЫМ УКРАИНСКИХ МЕТЕОСТАНЦИЙ

Цель. Целью исследования в данной работе является определение составляющих зенитной тропосферной задержки для разных станций на территории Украины и сравнение их между собой. **Методика.** При определении тропосферной задержки ее получают как сумму сухой и влажной составляющих. Расчеты составляющих зенитной тропосферной задержки проводились интегральным методом по данным аэрологических зондирований атмосферы. Поскольку сухая составляющая более прогнозируемая, то важно установить влияние влажной составляющей на суммарную поправку, которая является более чувствительной к изменению метеорологических параметров. **Результаты.** Для вычисления составляющих тропосферной задержки использованы данные аэрологических зондирований атмосферы, полученные на территории Украины, в частности на метеорологических станциях Львова, Киева, Одессы и Харькова в течение 2015 года. Эти данные дополнялись к верхней границе нейтральной атмосферы данными Стандартной модели атмосферы (СМА-81). На основе полученных атмосферных профилей проводились вычисления сухой и влажной составляющих зенитной тропосферной задержки. В результате вычислений получены графики изменения величин сухой и влажной составляющих, которые позволяют сравнить особенности и характер этих изменений в течение летнего периода на разных станциях. **Научная новизна.** В настоящее время вопросы исследования изменения тропосферной задержки и результаты ГНСС-измерений остаются актуальными, поскольку связаны с вопросом точного учета влияния тропосферы на спутниковые измерения, а соответственно, и с повышением точности определения координат пунктов на поверхности Земли. Актуальность вопроса заключается в том, что сегодня окончательно еще не сформулирован целостный подход к учету региональных климатических особенностей или состояний тропосферы и соответствующий их учет при исчислении величины задержки. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для построения региональных моделей изменения тропосферной задержки, а также для прогнозирования влияния тропосферы на ГНСС-измерения. Построенные графики изменения значений зенитной тропосферной задержки позволили оценить ее изменение в течение летнего периода, а также сравнить значения на разных станциях.

Ключевые слова: влияние тропосферы, тропосферная задержка, интегральный метод определения тропосферной задержки, ГНСС-измерения.

B. B. PALIANYTSIA, V. R. OLIYNYK, V. V. BOYKO.

Department of Higher Geodesy and Astronomy of Lviv polytechnic National university, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: pal-bb@ukr.net, oliynyk5561@gmail.com

THE RESEARCH OF CHANGE OF ZENITH TROPOSPERIC DELAY'S COMPONENTS

The aim. The aim of the research in this paper is to determine the components of zenith tropospheric delay for different stations in Ukraine and comparing them with each other. **Method.** When determination the tropospheric delay it is obtained as a sum of dry and wet components. Calculations of components of zenith troposphere delay were implemented by integral method using data upper-air sounding of atmosphere. Since the dry component is more predictable, an important task was to determine the impact of wet part on the total amendment, whereas the wet component is largely dependent on weather changes. **Results.** For calculation of the components of tropospheric delay there were used data of upper-air sounding of atmosphere received on the territory of Ukraine, in particular on meteorological stations of Lviv, Kiev, Odessa and Kharkiv during 2015 year. These data were supplemented to the upper limit of the neutral atmosphere with the data the Standard Model of the atmosphere (СМА-81). On the base of the received atmospheric profiles there were made the calculations of dry and wet components of zenith tropospheric delay. Using results of calculations diagrams of changes of dry and wet components were obtained that gives possibility to compare features and character of these changes during the year period at various stations. **Scientific novelty.** Currently, the researches of change of tropospheric delay in GNSS measurements results is actual because it is related to the issue of more accurate account of the impact of troposphere on satellite measurements, and therefore with increasing of accuracy of determination of points coordinates on the Earth's surface. The actuality of the issue lies in the fact, that today there has not been yet formulated a holistic approach taking into account regional climatic peculiarities or conditions of the troposphere and their corresponding when calculating the value of delay. **The**

practical significance. Obtained results can be used further for creation of regional models of change of troposphere delays, and to predict the impact of troposphere on the GNSS measurements. The diagrams of change of values of zenith tropospheric delay gave the opportunity to evaluate its change during the year period and to compare the values on different stations.

Key words: influence of troposphere, troposphere delay, integral method for determining troposphere delay, GNSS- measurements.

REFERENCES

- Zablotskyj F. *Do vyboru modelej vyznachennya skladovykh zenitnoyi troposfernoyi zatrymky pry geodynami chnykh doslidzhennykh* [To the choice of models for the determination of constituents of zenith tropospheric delay in radio-technical measurements.]. *Geodynamika* [Geodynamics]. Lviv, 2000, Vol. 1(3), pp. 1–7.
- Zablotskyj F. *Vyznachennya i ocinka skladovykh troposfernoyi zatrymky u GPS vymirax* [Definition and evaluation components of troposphere delay in GPS measurements]. *Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya* [Geodesy, cartography and aerial photography]. Lviv, 2001, Vol. 61, pp. 11–23.
- Zablotskyj F., Dovhan N., Palianytsia B. *Osoblyvosti formuvannya troposfernoyi zatrymky v Antarktydi (za danymy stanciyi Mak–Merdo)* [Peculiarities of forming of tropospheric delay in Antarctica (by the data of MkMurdo station)]. *Suchasni dosyagnennya geodezychnoyi nauky ta vyrobnyctva* [Modern achievements of geodesic science and industry]. Lviv, 2006, Vol. 1(11), pp. 115–119.
- Zablotskyj F., Zablotska *Analiz zenitnoyi troposfernoyi zatrymky v tyxookeanskykh tropichnykh shyrotax* [An analysis of zenith tropospheric delay in the Pacific tropical latitudes]. *Suchasni dosyagnennya geodezychnoyi nauky ta vyrobnyctva* [Modern achievements of geodesic science and industry]. Lviv, 2010, Vol. 1(19), pp. 50–55.
- Kablak N. *Metodyka vyznachennya vplyvu troposfery na rezultaty GNSS-vymiryuvan v merezhi aktyvnykh referencykh stancij* [Method of determining the troposphere influence on the results GNSS-measurement of active network reference stations]. *Suchasni dosyagnennya geodezychnoyi nauky ta vyrobnyctva* [Modern achievements of geodesic science and industry.] Lviv, 2013, Vol. 1(25), pp. 62–66.
- Paziak M. V., Zablotskyj F. *Porivnyannya vologoyi skladovoyi zenitnoyi troposfernoyi zatrymky vyvedenoyi iz GNSS vymiryuvan, z vidpovidnoyu velychynoyu iz radiozonduvannya* [Comparison of the wet component of zenith tropospheric delay derived from GNSS observation with corresponding value from radio soundings]. *Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya* [Geodesy, cartography and aerial photography]. Lviv, 2015, Vol. 81, pp. 16–24.
- Palianytsia B. *Osoblyvosti zminy atmosferynx popravok u suputnykovi viddalemirni vymiry* [Features of change of atmospheric correction in satellite distance measurements]. *Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya* [Geodesy, cartography and aerial photography]. Lviv, 1999, Vol. 59, pp. 27–29.
- Palianytsia B. *Doslidzhennya analitychnykh modelej troposfernoyi zatrymky* [Investigations of analytical models of atmospheric delay]. *Suchasni dosyagnennya geodezychnoyi nauky ta vyrobnyctva* [Modern achievements of geodesic science and industry]. Lviv, 2010, Vol. 1(19), pp. 120–122.
- Sluzhba atmosferynx doslidzen pry universyteti Vajomingu*. Internet resurs. Available at: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- Turchin N. *Suchasni pidkhody do vyznachennya troposfernoyi zatrymky ta yiyi skladovykh* [Modern approaches to determining troposphere delays and its components]. *Geodeziya, kartografiya i aerofotoznimannya* [Geodesy, cartography and aerial photography]. Lviv, 2015, Vol. 78, pp. 155–159.
- Ifadis I. M., Katsoungiannopoulos S., Pikridas C., Rossikopoulos D., and Fotiou A. Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radio-sonde Measurements and Permanent GPS Data. PS5.4 – GNSS Processing and Applications, XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8-13, 2006, P. 15.
- Mendes V. B., Langley R. B. A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data. Paper presented at KIS94, International Symposium on Kinematic System in Geodesy, Geomatics on Navigation, Banff, Canada, August 30 – September 2, 1994, 12 p.
- Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report no. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999, 353 p.
- Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. "Journal of Geophysical Research". Vol. 101, No. B2, 1996, pp. 3227–3246.
- Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysics. Monogr. Ser., vol.15, AGU, Washington, D.C., 1972, pp. 247–251.