

Б. Б. ПАЛЯНИЦЯ^{1*}, Б. В. КЛАДОЧНИЙ¹, О. Б. ПАЛЯНИЦЯ²

¹ Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: bohdan.b.palianytsia@lpnu.ua, bodya1379@gmail.com

² Кафедра обчислювальної математики, Львівський національний університет ім. Івана Франка, вул. Університетська, 1, Львів, 79000, Україна, ел. пошта: oksana.palianytsia@lnu.edu.ua

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.91.011>

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОТКОПЕРІОДИЧНИХ ЗМІН СКЛАДОВИХ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ

Мета цієї роботи – дослідити величину зміни складових зенітної тропосферної затримки для території України за даними кількодобових наземних метеорологічних вимірювань, а також побудувати та дослідити поля їхньої зміни. **Методика.** Точність визначення тропосферної затримки та її складових залежить від обсягу метеорологічних даних, які можна використати для її розрахунку. Найкраще, якщо на момент проведення ГНСС-вимірів були б дані аерологічного зондування атмосфери, отримані поблизу пункту спостережень. В іншому разі, доводиться моделювати метеорологічну ситуацію на момент проведення вимірів, використовуючи доступні для цього метеорологічні дані. У виконаних дослідженнях оцінено метеорологічну ситуацію загалом для території України. Складові зенітної тропосферної затримки обчислювали за відомою формулою Saastamoinen. За отриманими значеннями побудовано поле зміни сухої та вологої складових зенітної тропосферної затримки для території України. **Результати.** Результати досліджень дають змогу проаналізувати залежність зміни величини складових тропосферної затримки від зміни метеорологічних величин на території країни. У роботі отримано і проаналізовано графіки зміни складових тропосферної затримки протягом трьох діб із дискретністю 6 годин на чотирьох пунктах з різними кліматичними умовами. Встановлено, що, незважаючи на істотне розходження у значеннях складових, амплітуди їхньої зміни є близькими між собою: різниці цих амплітуд становлять для сухої складової 6 мм, для вологої – 2 мм. Показано динаміку зміни сухої (гідростатичної) та вологої (негідростатичної) складових протягом двох діб. Зазначено, що їхня динаміка зумовлена зміною атмосферного тиску для сухої складової та зміною тиску водяних парів у тропосфері для вологої складової. **Наукова новизна та практична значущість** полягають у виявленій стабільності амплітуди зміни складових на пунктах, що знаходяться у різних кліматичних і погодних умовах. Крім цього, підтверджено, що динаміка зміни сухої складової зумовлена зміною атмосферного тиску, а вологої – зміною парціального тиску. Виконані дослідження можна використовувати для створення регіональних моделей атмосфери та подальших досліджень поля зміни зенітної тропосферної затримки, оскільки стосуються зміни затримки в просторі та часі.

Ключові слова: тропосферна затримка, вплив тропосфери на супутникові виміри, методи визначення тропосферної затримки, визначення складових тропосферної затримки, ГНСС-виміри.

Вступ

Відомо, що тропосферна затримка є одним із найвагоміших чинників, що погіршують результати ГНСС-вимірів. Дослідження методів визначення та врахування цього чинника є актуальним завданням в епоху швидкого розвитку та широкого використання супутникових навігаційних систем. При цьому все важливішою стає проблема підвищення точності ГНСС-вимірювань, яка актуалізує питання врахування впливу тропосфери на результати цих вимірювань.

Проблемою дослідження тропосферної затримки активно займалися науковці з різних країн, серед яких [Askne, et al., 1987; Baby, et al., 1988; Ifadis, et. al., 2006; Mendes, 1999], а також в Україні. Останніми роками збільшилася кількість публікацій, присвячених цій тематиці на кафедрі вищої геодезії та астрономії Національного університету “Львівська політехніка”. У деяких роботах досліджують методи визначення величини тропосферної затримки сигналу, що поширюється від ШСЗ до приймача, розташованого на пункті спостережень

[Каблак, 2013; Пазяк та Заблоцький, 2015, 2018; Турчин, 2015; Паляниця та ін., 2016; Хоптар, 2017], а в інших – досліджують кількість водяної пари у тропосфері Землі [Zablotskyi, et al., 2017; Paziak, 2019].

Мета

Метою роботи – дослідити величини зміни зенітної тропосферної затримки та її складових для території України за даними кількадесятих наземних метеорологічних вимірювань, а також побудувати та дослідити поля зміни її складових.

Вихідні дані

Як вихідні значення для досліджень взято архівні дані, які надає інтернет ресурс [Raspisaniye Pogodi Ltd.], а саме: приземні метеорологічні виміри (температура повітря, атмосферний тиск та відносна вологість повітря), проведені на метеостанціях та на території аеропортів у період жовтня 2018 року. Такі дані вибрано для кожного обласного центру України. Цим самим забезпечено відповідну густоту пунктів та рівномірність їхнього розташування по всій території країни. У результаті отримано мережу пунктів приблизно рівномірно розташованих на території країни. Відстань між пунктами коливається у межах 60–240 км.

Методика досліджень

Точність визначення тропосферної затримки безпосередньо залежить від обсягу метеорологічних даних, які можна використати для її розрахунку. Найкраще, якщо на момент проведення ГНСС-вимірів були б дані аерологічного зондування атмосфери, отримані недалеко від пункту спостережень. Але, оскільки така можливість відсутня, то доводиться певним чином моделювати метеорологічну ситуацію на момент проведення вимірів, використовуючи доступні для цього дані. У виконаних дослідженнях зроблено спробу оцінки метеорологічної ситуації загалом для території України, і, обчисливши значення тропосферної затримки

та її складових, побудувати графіки їхньої зміни для даної території.

Тропосферну затримку традиційно розглядають як суму сухої (гідростатичної) та вологої (негідростатичної) складових:

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

Для різних значень зенітної відстані тропосферну затримку можна обчислювати, помноживши зенітні значення складових затримки на відповідні функції відображення $m(Z)$. Тоді формула (1) набуде такого вигляду:

$$d_{trop}^z = d_h^z \cdot m_h(Z) + d_w^z \cdot m_w(Z), \quad (2)$$

де d_h^z і d_w^z – гідростатична (суха) і негідростатична (волога) складові зенітної тропосферної затримки, $m_h(Z)$ і $m_w(Z)$ – функції відображення сухої та вологої складових, відповідно.

Складові тропосферної затримки у (2) обчислюються інтегральними формулами за даними аерологічного зондування атмосфери або за аналітичними формулами. У цій роботі використано приземні значення метеорологічних величин, тому обчислення проведено за аналітичними формулами, зокрема за формулами Saastamoinen [Saastamoinen, 1972]. Відомо, що вони дають надійні результати значень зенітної тропосферної затримки для нашого регіону.

Формула Saastamoinen для сухої складової зенітної тропосферної має такий вигляд:

$$d_{hSA} = \frac{0.002277 \cdot P_s}{(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 28 \cdot 10^{-8} H_s)}, \quad (3)$$

а для вологої:

$$d_{wSA} = 0.002277 \cdot \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) \cdot e_0. \quad (4)$$

У формулах (3) і (4): φ і H_s – географічна широта та висота станції спостережень; T_s, P_s, e_0 – приземні значення температури повітря, атмосферного і парціального тиску, відповідно.

Результати досліджень

На початку взято приземні значення метеорологічних величин на пунктах: Львів, Київ, Луганськ і Одеса, отримані в осінній період протягом трьох днів з інтервалом 6 годин.

Потрібно зазначити, що кожен із пунктів розташований у іншій кліматичній зоні з певними особливостями: Львів – неподалік Карпатських гір, Київ – у більш континентальній зоні, Луганськ – у степовій зоні, а Одеса – на березі моря. За отриманими значеннями побудовано графіки зміни складових тропосферної затримки.

На графіках можна побачити, що на вибраних пунктах спостереження протягом вказаного періоду відбувається збільшення

сухої складової. На пунктах Львів та Одеса значення затримки збільшувалось рівномірно, а на пункті Луганськ помітно раптове збільшення у другий день спостереження. На пункті Київ відбувалось нерівномірне зростання складової із різким спадом у першій половині другого дня.

Суха складова змінювалась у межах 15 мм, що порівняно з середнім значенням складової 2300 мм становить 0,6 % і є незначною зміною.

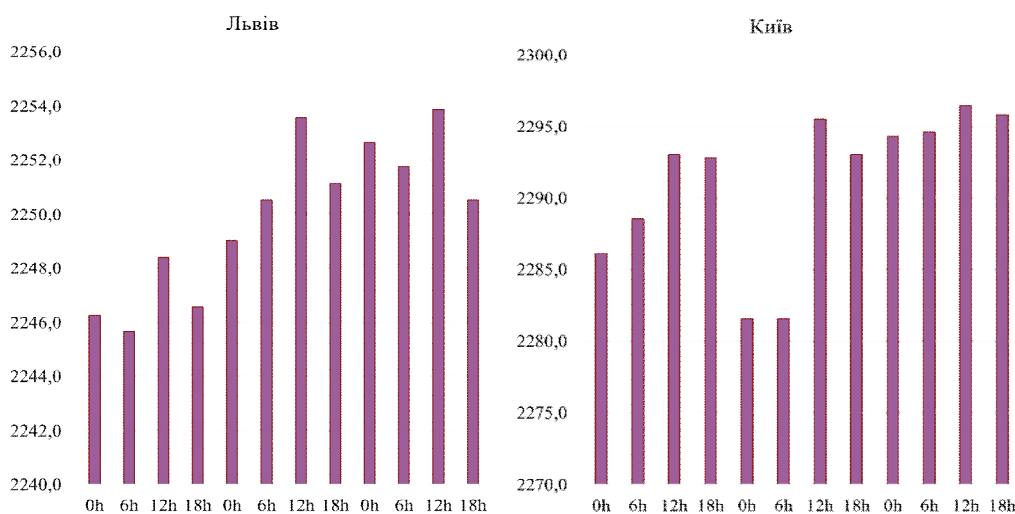


Рис. 1, 2. Зміна сухої складової затримки протягом трьох днів на пунктах Львів та Київ



Рис. 3, 4. Зміна сухої складової затримки протягом трьох днів на пунктах Луганськ та Одеса

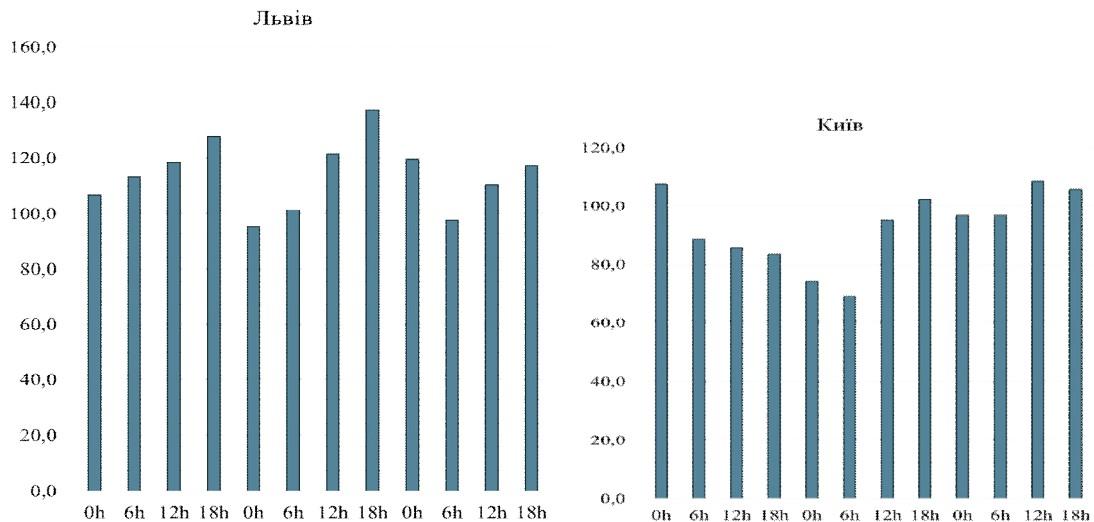


Рис. 5, 6. Зміна вологосторощової затримки протягом трьох днів на пунктах Львів та Київ

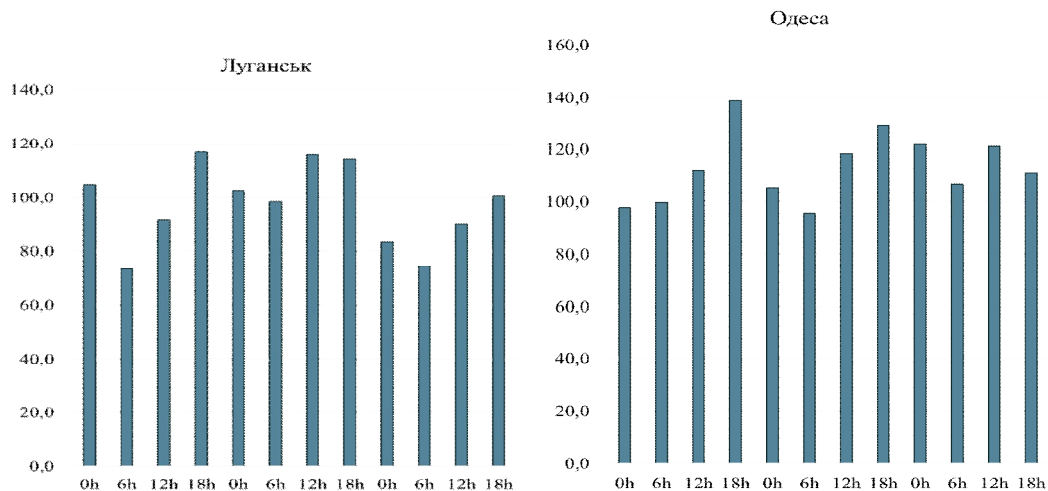


Рис. 7, 8. Зміна вологосторощової затримки протягом трьох днів на пунктах Луганськ та Одеса

Волога складова є більш мінливою і складно прогнозованою. Якщо розглядати її зміну протягом доби, можна помітити, що найбільших значень вона набуває у другій половині дня та зменшується вночі та зранку. Максимальне зростання складової – понад 40 мм – помітно у другій половині дня, коли денна температура повітря є найвищою. Це пояснюється тим, що, незважаючи на обернено пропорційну залежність між температурою повітря і вологою складовою (це видно у формулі 4), викликана зміною температури зміна парціального тиску суттєвіше впливає на значення складової, змінюючи її в іншу сторону. Волога складова

змінювалась у межах 50 мм, що, враховуючи середнє значення складової близько 100 мм, є відчутним і становить в окремих випадках майже 50 % від величини вологосторощової.

Амплітуду зміни складових на вибраних пунктах показано в табл. 1 і 2. Видно, що, незважаючи на суттєві розходження у значеннях поправок, амплітуди їхніх змін є доволі близькими за значенням, а для вологосторощової – практично рівними.

Надалі, як в [Кладочний, Паляниця, 2018], за метеорологічними даними, вибраними для кожного обласного центру України, побудовано поля сухої та вологосторощової тропосферної

затримки, та, для порівняння, поля атмосферного і парціального тиску.

Таблиця 1

| Назва пункту | Значення сухої складової, мм | | |
|--------------|------------------------------|------|---------|
| | Макс. | Мін. | Різниця |
| Львів | 2254 | 2246 | 8 |
| Київ | 2295 | 2281 | 14 |
| Луганськ | 2313 | 2300 | 13 |
| Одеса | 2327 | 2315 | 12 |

Таблиця 2

| Назва пункту | Значення вологої складової, мм | | |
|--------------|--------------------------------|------|---------|
| | Макс. | Мін. | Різниця |
| Львів | 140 | 96 | 44 |
| Київ | 110 | 64 | 46 |
| Луганськ | 119 | 73 | 46 |
| Одеса | 140 | 97 | 44 |

На приведених нижче рисунках очевидно є кореляція сухої та вологої складової тропосферної затримки із значеннями атмосферного та парціального тиску, відповідно. Крім цього, за даними, що використовувалися для обчислень, простежується закономірність, що суха складова є

більшою у центральній частині України, а волога складова – на півдні та на заході країни.

Щоб проілюструвати динаміку складових і метеорологічних величин, що максимально впливають на їхні зміни, на рис. 9–20 показано зображення, отримані з інтервалом 12 годин, тобто на 12 год 10 жовтня, та на 0 год і 12 год за Київським часом 11 жовтня 2018 року.

На наведених рисунках показано динаміку зміни атмосферного тиску і сухої складової тропосферної затримки. Бачимо, що суха складова повторює зміни атмосферного тиску, але змінюється динамічніше. На рис. 9–12 це спостерігається західніше Харкова та східніше Львова. Стосовно вологої складової, то вона змінюється значно швидше, ніж суха складова і корелює зі зміною парціального тиску.

Як бачимо із наведених рисунків, динаміка зміни сухої складової є незначною, як і атмосферного тиску, незважаючи на те, що один із моментів часу припадає на нічний період. Стосовно вологої складової, то динаміка її зміни є більшою, хоча у значно меншому масштабі, причому ця зміна була іншою на різних пунктах території України.

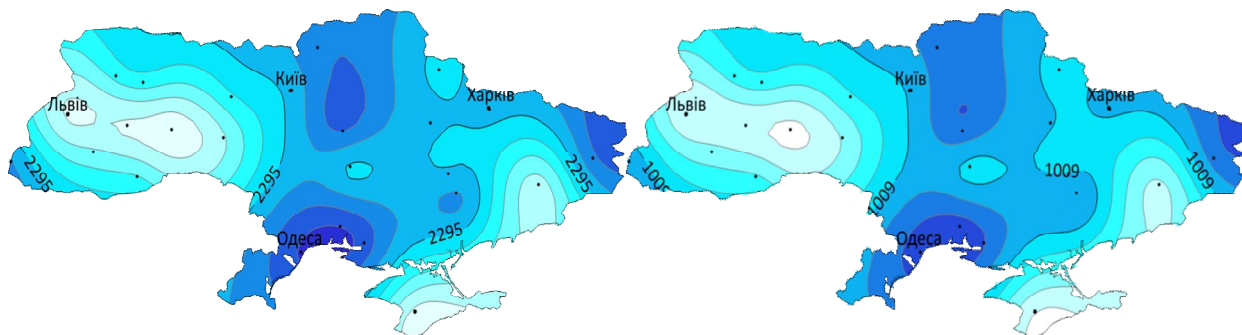


Рис. 9, 10. Поле атмосферного тиску (ліворуч у ГПа) і сухої складової (праворуч у мм) станом на 12 год 10 жовтня

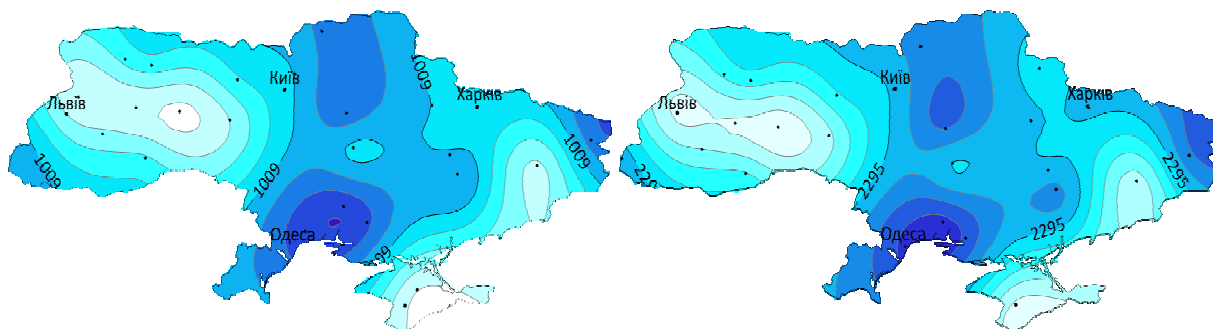


Рис. 11, 12. Поле атмосферного тиску (ліворуч) і сухої складової (праворуч) станом на 00 год 11 жовтня

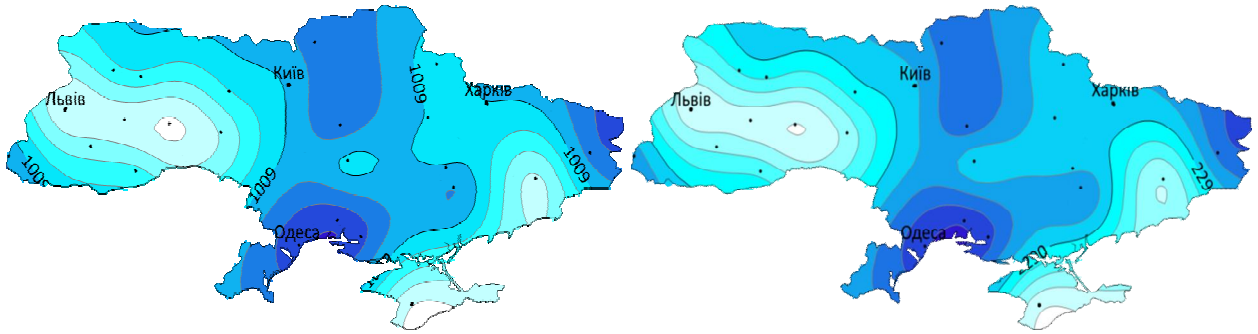


Рис. 13, 14. Поле атмосферного тиску (ліворуч) і сухої складової (праворуч) станом на 12 год 11 жовтня

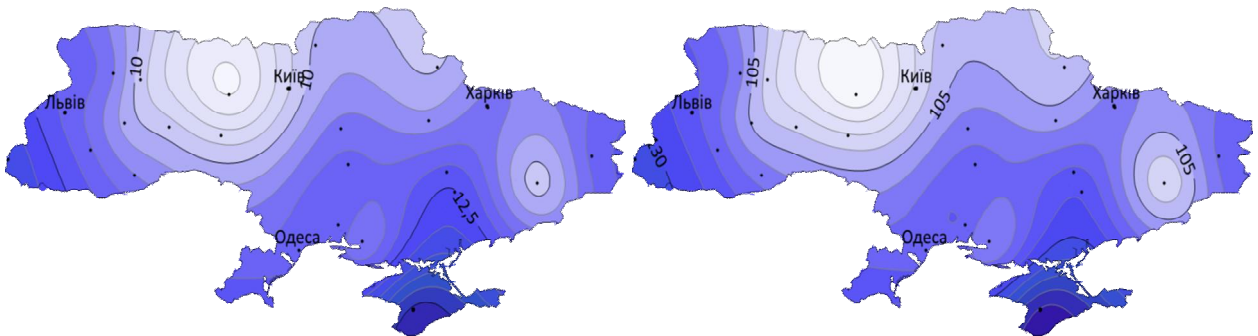


Рис. 15, 16. Поле парціального тиску (ліворуч) і вологості складової (праворуч) станом на 12 год 10 жовтня

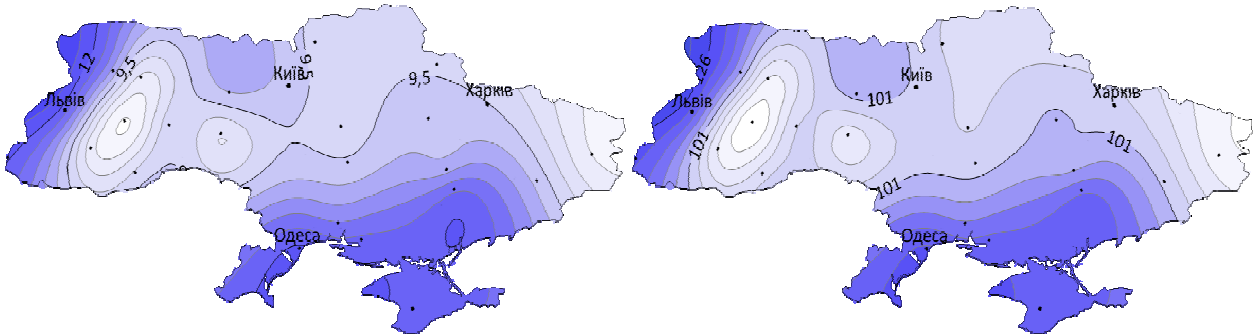


Рис. 17, 18. Поле парціального тиску (ліворуч) і вологості складової (праворуч) станом на 00 год 11 жовтня

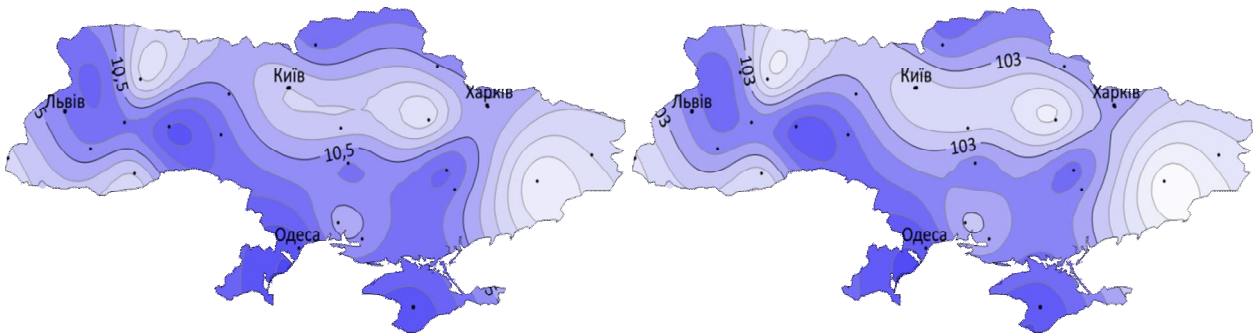


Рис. 19, 20. Поле парціального тиску (ліворуч) і вологості складової (праворуч) станом на 12 год 11 жовтня

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна проведених досліджень полягає у виявленій стабільності амплітуди зміни складових на пунктах, що знаходяться у різних кліматичних і погодних умовах. Крім цього, підтверджено, що динаміка зміни сухої складової зумовлена зміною атмосферного тиску, а вологої – зміною парціального тиску. Отримані результати можуть використовуватися для створення регіональних моделей атмосфери та подальших досліджень поля зміни зенітної тропосферної затримки, оскільки стосуються зміни затримки в просторі та часі.

Висновки

Розглядаючи розподіл значень затримки на території України за вказаний триденний період, можна сказати, що суха складова набуває більшого значення у південній та центральній частині території України. У зазначений період волога складова виявилася більшою у південній частині України, де відносна вологість вища, а також на західній Україні у зв'язку із погодними умовами та вищою вологістю повітря. Її важко спрогнозувати, оскільки вона залежить від температури повітря і вологості, які по-різному впливають на величину цієї складової.

Встановлено, що, незважаючи на суттєве розходження у значеннях складових, амплітуди їхньої зміни є близькими між собою: різниці цих амплітуд становлять для сухої складової 6 мм, для вологої – 2 мм.

Динаміка зміни сухої складової є меншою у цей період, ніж вологої, і зумовлена значною мірою зміною атмосферного тиску, а зміна вологої складової – зміною тиску водяних парів у тропосфері Землі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Кладочний Б., Паляниця Б. Дослідження добових змін зенітної тропосферної затримки. *Міжнародна науково-технічна конференція GeoTerrace-2018*. Львів, Україна, 13–15 грудня 2018 р. С. 21–24.
- Каблак Н. Методика визначення впливу тропосфери на результати GNSS-вимірювань в мережі активних референціальних станцій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2013. Вип. 1(25). С. 62–66.
- Пазяк М., Заблоцький Ф. Особливості вертикального розподілу вологої складової зенітної тропосферної затримки в середніх і тропічних широтах. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 2018. Вип. II(36). С. 41–49.
- Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д. Порівняння вологої складової зенітної тропосферної затримки виведеної із GNSS-вимірювань, з відповідною величиною із радіозондування. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 2015. Вип. 81. С. 16–24.
- Paziak M., Determination of precipitable water vapour, from the data of aerological and GNSS measurements at european and tropical stations. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2019, issue 89, pp. 20–28.
- Паляниця Б. Б., Олійник В. Р., Бойко В. М. Дослідження річних змін зенітної тропосферної затримки за даними Українських метеостанцій. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 2016. Вип. 83. С. 13–20.
- Турчин Н., Заблоцький Ф. Сучасні підходи до визначення тропосферної затримки та її складових. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 2015. Вип. 78. С. 155–159.
- Хоптар А. Методика визначення тропосферних параметрів із сумісних даних GNSS і SLR спостережень. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 2017. Вип. II(34). С. 51–54.
- Askne J., Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, 1987. Vol. 22. No. 3. P. 379–386.

- Baby H. B., Gole P., Lavernat J. A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements. *Radio Science*. 1988. V. 23. No. 6. P. 1023–1038.
- 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. 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.
- Raspisaniye Pogodi Ltd., St. Petersburg, Russia, Інтернет ресурс [Режим доступу]: gp5.ua.
- 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.
- Zablotskyi F., Gresko Ju., Palanytsa B. Monitoring of water vapor content by radio sounding data at the Kyiv aerological station and by GNSS observation data at the GLSV station. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2017, issue 85, pp. 13–17.

B. PALIANYTSIA^{1*}, B. KLADOCHNYI¹, O. PALIANYTSIA²

¹ Department “Higher geodesy and astronomy” of Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail bohdan.b.palanytsia@lpnu.ua, bodya1379@gmail.com

² Department of Computational Mathematics, Ivan Franko National University of Lviv, 1, Universytetska Str., Lviv, 79000, Ukraine, e-mail oksana.palanytsia@lnu.edu.ua

THE RESEARCH OF SHORT-PERIODIC COMPONENTS CHANGES OF ZENITH TROPOSPHERE DELAY

The aim of this work – research of the magnitude of the change in the components of the zenith tropospheric delay for the territory of Ukraine according to several-day ground-based meteorological measurements, as well as the construction and study of the field of their change. **Method.** The accuracy of the determination of the tropospheric delay depends on the amount of meteorological data that can be used to calculate it. It is better if, at the time of the GNSS measurements, the atmospheric sensing data were obtained near the observation point, otherwise it is necessary to simulate the meteorological situation at the time of the measurements using the data available for that purpose. The fulfilled researches evaluated the meteorological situation as a whole for the territory of Ukraine. The tropospheric delay was calculated using the well-known Saastamoenen formula. The range of change of tropospheric delay for the territory of Ukraine was subsequently created. **Results.** The results of the research make it possible to analyze the dependence of the change in the magnitude of the components of the tropospheric delay on the change in meteorological values in the territory of the country. The graphs of changes in tropospheric delay components during three days with the discreteness of 6 hours at four points with different climatic conditions were obtained and analyzed in the work. It is established that despite the significant difference in the values of the components, the amplitudes of their change are close to each other: the differences of these amplitudes are 6 mm for the dry component and 2 mm for the wet component. The dynamics of change of dry (hydrostatic) and wet (non-hydrostatic) components during two days is shown. It is noted that their dynamics is due to the change of

atmospheric pressure for the dry component and the change of water vapour pressure in the troposphere for the wet component. **Scientific novelty and practical significance** are in the revealed stability of the amplitude of change of components at points located in different climatic and weather conditions. Also, it was confirmed that the dynamics of change in the dry component is due to changes in atmospheric pressure, and wet – due to changes in partial pressure. The performed researches can be used to create regional models of the atmosphere and further studies of the field of change of the zenith tropospheric delay, as they relate to the change of the delay in space and time.

Key words: tropospheric delay, the impact of the troposphere on satellite measurements, methods for determining tropospheric delay, determination of components of tropospheric delay, GNSS measurements.

Надійшла 04.04.2020 р.