

АНАЛІЗ СЕЗОННИХ ЗМІН СКЛАДОВИХ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ, ВИЗНАЧЕНИХ ЗА ДАНИМИ РАДІОЗОНДУВАНЬ І ГНСС-ВИМІРІВ

Мета цієї роботи – проаналізувати зміну значень гідростатичної та вологої складових зенітної тропосферної затримки (ЗТЗ), визначених для усіх сезонів року. Складові ЗТЗ встановлюють сьогодні переважно так: гідростатичну – за однією із наявних аналітичних моделей, здебільшого за моделлю *Saastamoinen*, а вологу – за результатами ГНСС-вимірювань із використанням модельного значення гідростатичної складової. Під час дослідження ми також оцінювали точність отриманих значень гідростатичної та вологої складових ЗТЗ за аналогічними складовими, знайденими за даними радіозондування. Для цього підбирали пару порівняно близьких одна від одної станцій – аерологічної та референційної ГНСС-станції. Для реалізації викладеної методики досліджень було вибрано аерологічну станцію Praha-Libus і референційну ГНСС-станцію GOPE. Для опрацювання й аналізу вибирали дані радіозондування нейтральної атмосфери з першої станції та повні значення ЗТЗ (гідростатична плюс волога складові) із другої станції. Такі дані вибирали щомісячно з 1-ї по 10-ту дати 2012 р. на 12-ту год Всесвітнього часу. За даними радіозондування визначено гідростатичні та вологі складові ЗТЗ (прийняті надалі як еталонні) і таку саму кількість значень повних ЗТЗ, виведених на цю саму годину із ГНСС-вимірювань на референційній станції GOPE. На їх підставі обчислено значення вологої складової ЗТЗ і порівняно їх із відповідними даними, отриманими із радіозондувань. Встановлено, що для похибки гідростатичної складової характерна чітко виражена сезонна зміна, від суто додатних величин у діапазоні 2–7 мм у січні з переходом через нуль у квітні (жовтні) й до виключно від’ємних у діапазоні 3–5 мм у липні. Стосовно похибки вологої складової ЗТЗ зазначимо що вона упродовж усього року набуває лише від’ємних значень без чітко вираженого сезонного ходу. Зауважимо, що максимальні абсолютні значення цієї похибки у липні, вони перевищують –30 мм, що пояснюється максимальним вмістом водяної пари у тропосфері у цей час. Проте виключно від’ємні значення похибки вологої складової вказують і на систематичне зміщення її значень. У цій роботі подано рекомендації щодо подальших досліджень у напрямі підвищення точності визначення як гідростатичної, так і вологої складової ЗТЗ, а також причин сезонних змін точності визначення, особливо гідростатичної складової.

Ключові слова: зенітна тропосферна затримка; гідростатична і волога складові ЗТЗ; радіозондування атмосфери; ГНСС-вимірювання.

Вступ

Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) визначення місцеположення сьогодні домінують у геодезії та навігації. Попри оперативність та всепогодність проведення ГНСС-вимірювань, вони забезпечують доволі високу точність отримуваних результатів. Ця точність досягається регламентацією цілої низки похибок, значення яких або достатньо успішно коригують, або виключають [Hoffman–Wellenhof et al., 2001]. Серед них основною похибкою, яку важко урахувати для високоточних ГНСС-вимірювань, є похибка, спричинена впливом нейтральної

атмосфери (тропосфери і стратосфери). Цю похибку називають тропосферною затримкою, вона має дві складові – гідростатичну і вологу. У зенітному напрямку значення повної зенітної тропосферної затримки (гідростатична плюс волога складові) коливається на рівні моря залежно від фізико-географічних умов, приблизно від 2,2 до 2,5 м. Значення гідростатичної складової становить близько 90 % від значення повної ЗТЗ і її можна змодельовати доволі точно лише за достовірним вимірюванням атмосферного тиску під час спостережень на висоті антени ГНСС-приймача. Для цього здебільшого

використовують модель *Saastamoinen* [Mendes, 1999; Saastamoinen, 1972], яку покладено в основу багатьох програм для опрацювання ГНСС-вимірювань. Однак проблема точного визначення зенітної тропосферної затримки полягає у вологій складовій, яка хоч і становить у середньому 10 % від повної величини ЗТЗ, проте не може бути визначена модельним способом із задовільно достатньою точністю, оскільки просторово-часовий розподіл водяної пари в атмосфері не підпорядкований жодній закономірності [Заблоцький та ін., 2014].

Постановка проблеми

Значення вологості складової можна достатньо точно визначити лише із застосуванням надто громіздких і затратних технологій, таких як: радіозондування нейтральної атмосфери, радіометри водяної пари, лідарні системи тощо [Заблоцький, 2013]. Щоправда, вони, окрім затратності (особливо друга і третя), мають ще й недоліки внаслідок таких причин, як часові зміщення, спричинені тривалістю вимірювання, погодні обмеження (хмари, дощ) тощо. Тому донедавна вологу складову зенітної тропосферної затримки визначали за емпіричними (аналітичними) моделями, наприклад: *Saastamoinen*, *Hopfield*, *Chao*, *Ifadis*, *Askne and Nordius* та іншими [Mendes, 1999]. Разом з тим, всі наявні моделі не можуть забезпечити достатньої точності визначення вологості складової ЗТЗ. Можливість вирішення цієї проблеми з'явилась із започаткуванням нового наукового напрямку GPS-метеорології [Bevis et al., 1992], яку віднедавна називають ГНСС-метеорологія (ГНСС-метеорологія ґрунтується на низці теоретичних засад радіометеорології – наукового напрямку, предметом вивчення якого, з одного боку, є вплив атмосфери і метеорологічних умов на поширення електромагнітних хвиль, а з іншого – використання електромагнітних хвиль для дослідження атмосфери). Тепер суть визначення вологості складової зенітної тропосферної затримки зводиться до такого: на підставі ГНСС-вимірювань, застосовуючи ГНСС-розв'язки для основного рівняння кодівих або фазових псевдовідстаней із ГНСС-спостережень, отримують за певними інтервально-часовими розв'язками повну тропосферну затримку на середній зенітній відстані місцеположення ГНСС-супутника. Далі, застосовуючи

функцію відображення, одержують повну зенітну тропосферну затримку [Mendes, 1999; Schueler et al., 2002]. Потім обчислюють гідростатичну складову ЗТЗ за аналітичною моделлю, наприклад *Saastamoinen*, за точно виміряними значеннями атмосферного тиску на висоті антени ГНСС-приймача. За різницею між повною ЗТЗ, виведеною із ГНСС-вимірювань, і обчисленою гідростатичною складовою отримують величину вологості складової ЗТЗ на заданий момент часу, яку називають вологою складовою ЗТЗ, виведеною із ГНСС-вимірювань [Bevis et al., 1992]. Далі, за необхідності, для потреб метеорології за вологою складовою ЗТЗ можна знайти, виконавши нескладні розрахунки, величину інтегрованої водяної пари.

Зазначимо, що для оцінювання точності отримання повної ЗТЗ чи її складових, зокрема, використовують за можливості дані радіозондування атмосфери. Радіозондування дає доволі точні результати за рахунок безпосередніх контактних вимірювань основних метеорологічних величин атмосфери на висотах до 30–35 км. Вони містять відомості про вертикальні профілі атмосферного тиску, температури і характеристик вологості повітря, швидкості й напрямку вітру [Відділ атмосферних досліджень Університету Вайомінга]. Зондування здійснюють на аерологічних станціях, які здебільшого призначені для обслуговування роботи аеропортів і є основою світової гідрометеорологічної мережі. Опрацювання даних радіозондування дає змогу надійно оцінювати як величину ЗТЗ загалом, так і її складових.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові роботи стосовно розроблення чи удосконалення методів підвищення точності визначення як значення ЗТЗ, так і, зокрема, її складових – гідростатичної чи сухої та вологості – опублікували за останній час низка вітчизняних і зарубіжних науковців, зокрема [Заблоцький та ін., 2014; Zablotskyi, et al., 2021; Каблак, 2011; Паляниця та ін., 2020; Hdidon et al., 2018; Schueler et al., 2002; Zus et al., 2019] та ін.

Однак, незважаючи на значну кількість досліджень за цим напрямом, опрацювання питання точності визначення складових ЗТЗ не завершено через сезонну зміну значення гідростатичної складової ЗТЗ, визначеного за моделлю

Saastamoinen. Річна амплітуда цієї зміни може перевищувати 10 мм, а тому потрібні подальші дослідження і уточнення.

Виклад основного матеріалу

1. Характеристика вхідних даних

Вхідними даними в дослідженні вибрано вертикальні профілі основних метеорологічних величин, а саме: атмосферного тиску, температури та відносної вологості повітря, отриманих за допомогою радіозондувань з 1-ї по 10-ту дати січня – грудня 2012 р. о 12-й год Всесвітнього часу на аерологічній станції Praha –Libus (координати: $\varphi = 50^\circ 00'$, $\lambda = 14^\circ 27'$, $H = 303.0$ м). Цю станцію вибрано з тих міркувань, що вона облаштована найсучаснішим обладнанням для вимірювання основних метеорологічних величин у тропосфері та стратосфері, а також через те, що там стабільно здійснюються радіозондування [Відділ атмосферних досліджень, Університет Вайомінга].

Оскільки процедура визначення вологості складової ЗТЗ поєднує повну зенітну тропосферну затримку, виведену із ГНСС-вимірювань, то такі дані надають центри опрацювань європейських мереж перманентних ГНСС-станцій, зокрема [Архів даних космічної геодезії NASA]. Тому як пару до аерологічної станції Praha – Libus було вибрано найближчу референцну ГНСС-станцію GOPE (координати: $\varphi = 49^\circ 54'$, $\lambda = 14^\circ 47'$, $H = 592,6$ м). Зазначимо, що станція GOPE розміщена в обсерваторії НДІ геодезії, топографії та картографії в м. Здібі (ЧР). Оскільки обидві зазначені станції розміщені на різних висотах, то для отримання достовірних результатів необхідно вертикальні профілі атмосферного тиску, температури і відносної вологості повітря станції Praha-Libus привести до висоти станції GOPE, як описано в роботі [Zablotskyi, et al., 2021].

2. Визначення гідростатичної та вологості складових ЗТЗ за даними радіозондування

Гідростатична складова ЗТЗ визначається за формулою [Заблоцький, 2000]:

$$d_h^z = 10^{-6} \frac{H_d}{H_0} K_1 \frac{P}{T} \frac{e}{e} - 0.378 \frac{e}{P} \frac{1}{\varphi} dH, \quad (1)$$

де H_0 – висота поверхні станції, км; H_d – висота верхньої межі сухої чи гідростатичної атмосфери; $K_1 = 77,624$ – емпіричний коефіцієнт за даними Essen and Froome; P і e – атмосферний тиск

повітря і парціальний тиск водяної пари, гПа; T – температура повітря за шкалою Кельвіна; dH – висота поточного прошарку атмосфери.

Вологу складову ЗТЗ визначають так [Mendes, 1999]:

$$d_w^z = 10^{-6} \frac{H_w}{H_0} \frac{e}{e} K_2 - K_1 \times 0.622 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \frac{1}{Z_w^{-1}} dH, \quad (2)$$

де H_w – висота верхньої межі вологої атмосфери; $K_2 = 64,7$ і $K_3 = 371900$ – емпіричні коефіцієнти за даними Essen and Froome; Z_w^{-1} – коефіцієнт стисливості водяної пари для переходу від ідеального до неідеального газу [Mendes, 1999].

3. Визначення вологості складової ЗТЗ із ГНСС-вимірювань

Повна зенітна тропосферна затримка визначається так:

$$d_{\text{трон}}^z = d_h^z + d_w^z \quad (3)$$

де d_h^z – гідростатична складова ЗТЗ; d_w^z – волога складова ЗТЗ.

Гідростатичну складову визначаємо за формулою *Saastamoinen*:

$$d_{hSA}^z = \frac{0,002277 \times P_0}{1 - 0,0026 \times \cos 2\varphi - 0,28 \times 10^{-6} \times H}, \quad (4)$$

де P_0 – значення атмосферного тиску на висоті антени ГНСС-приймача; φ і H – широта і висота пункту спостережень, причому висота H повинна відповідати висоті антени ГНСС-приймача.

Зазначимо: якщо у лівій частині формули (3) повна зенітна тропосферна затримка виведена із ГНСС-вимірювань, то і волога складова теж буде вважатись отриманою із ГНСС-вимірювань. Отже, позначимо їх, відповідно, як $d_{\text{trop GNSS}}^z$ і $d_{\text{w GNSS}}^z$. Гідростатичну складову, обчислену за формулою *Saastamoinen*, позначимо d_{hSA}^z . Тоді волога складова дорівнюватиме:

$$d_{\text{w GNSS}}^z = d_{\text{trop GNSS}}^z - d_{hSA}^z. \quad (5)$$

4. Аналіз точності значень гідростатичної складової ЗТЗ та їх сезонних змін

Значення різниць гідростатичних складових ЗТЗ обчислюється за формулою:

$$\Delta d_{hSA}^z = d_{h\text{зонд}}^z - d_{hSA}^z, \quad (6)$$

де у правій частині перший член виражає гідростатичну складову, встановлену за даними

радіозондування, другий член – величину, обчислену за формулою (4). Власне, величини Dd_{hSA}^z відображають точність гідростатичної складової, визначеної за моделлю *Saastamoinen*. Якщо прийняти величину гідростатичної складової, визначену за даними радіозондування, за еталонну (істинну) величину, незважаючи на деякі недоліки радіозондування, то різницю Dd_{hSA}^z можна прийняти за абсолютну похибку гідростатичної складової, обчисленої за моделлю *Saastamoinen*. Ці величини, графічно показані на рис. 1, стосуються першої декади середнього місяця кожного сезону 2012 р.

Як бачимо, ця похибка гідростатичної складової ЗТЗ має чітко виражену сезонну зміну (зміщення), починаючи від виключно додатних значень у діапазоні 2–7 мм у січні з переходом через нуль у квітні, досягаючи суто від’ємних величин в діапазоні 3–5 мм у липні. Далі, як бачимо, відбувається зворотний процес (липень, жовтень).

З одного боку, систематичні зміщення можуть пояснюватись істотною відмінністю стратифікації верхньої тропосфери і нижньої стратосфери у досліджувані періоди від прийнятої у моделі *Saastamoinen* стратифікації нейтральної атмосфери для побудови моделі гідростатичної складової. *Saastamoinen* поклав в основу своєї моделі той факт, що атмосфера відповідає

статичному стану, температура повітря приблизно до 10 км падає рівномірно, тобто розподіл температури в тропосфері розглядається як лінійна функція висоти. Далі він прийняв, що в тропоспаузі градієнт температури дорівнює нулю, а в стратосфері до висоти приблизно 50 км температура постійна чи дещо зростає з висотою [Saastamoinen, 1972]. Отже, *Saastamoinen* взяв за основу фактично стандартну модель атмосфери.

З іншого боку, відстань між станціями Prague – Libus і GOPE становить 28 км. А це може бути вже максимальною відстанню для збереження однакової погоди на обох станціях. Причиною систематичної відмінності результатів може бути також те, що висоти цих станцій належать до різних систем. Отже, висоту аерологічної станції Прага – Лібус розраховано від поверхні квазігеоїда, а висоту GNSS-станції GOPE – від загального земного еліпсоїда GRS80.

Графіки на рис. 1 явно вказують на сезонну зміну похибки гідростатичної складової *Saastamoinen*, що, очевидно, пов’язано із сезонною зміною температури повітря у нейтральній атмосфері. Можливо, цього явища можна уникнути, ввівши у формулу (4) певну функціональну залежність від температури повітря. Тому доцільно, на наш погляд, виконати такі самі дослідження ще на декількох парах станцій, розміщених у Центральній і Східній Європі.

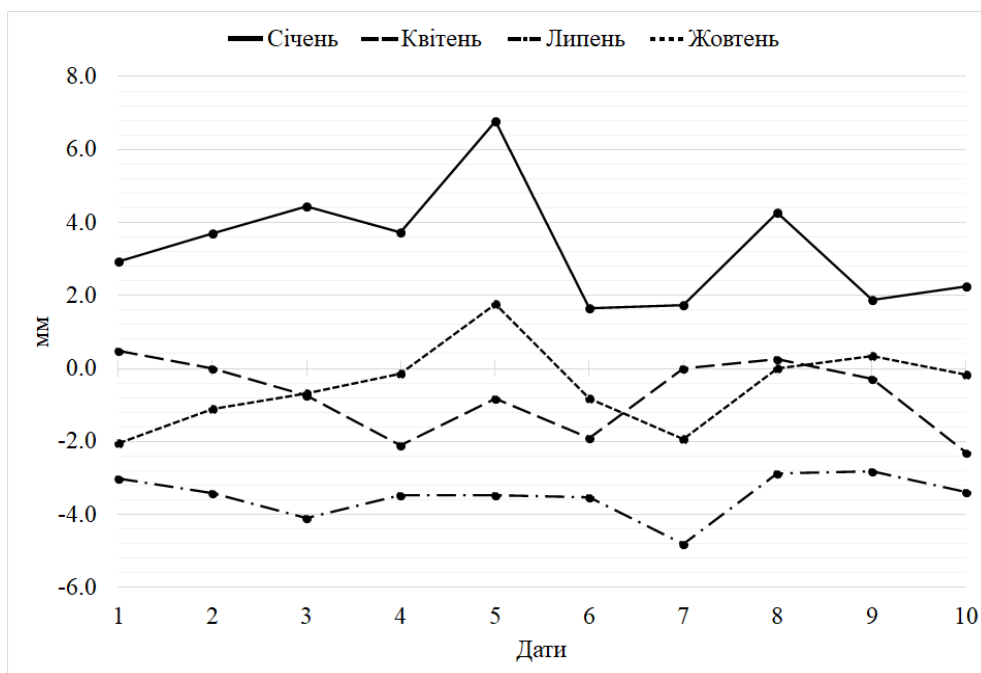


Рис. 1. Похибки Dd_{hSA}^z для перших декад середніх місяців сезонів

5. Аналіз точності значень вологої складової ЗТЗ та їх сезонних змін

Значення різниць вологих складових ЗТЗ обчислено за формулою:

$$Dd_{w\text{ GNSS}}^z = d_{w\text{ зонд}}^z - d_{w\text{ GNSS}}^z, \quad (7)$$

де у правій частині перший член виражає вологу складову ЗТЗ, визначену за даними радіозондування, другий член – таку саму величину, виведену із ГНСС-вимірювань.

Різницю $Dd_{w\text{ GNSS}}^z$ приймемо (за аналогією із підходом установлення похибки гідростатичної складової) за абсолютну похибку вологої складової ЗТЗ, виведеної із результатів ГНСС-вимірювань. Оцінимо цю величину. Як видно з формули (5), похибка вологої складової ЗТЗ залежить від похибки повної величини ЗТЗ $d_{\text{троп}}^z$ і від похибки гідростатичної складової ЗТЗ $d_{h\text{ SA}}^z$, обчисленої за формулою (4). Значення похибок

вологої складової, виведеної із результатів ГНСС-вимірювань, наведено на рис. 2, а числові значення цих похибок подано для кращої читабельності в таблиці.

Стосовно точності значень вологої складової ЗТЗ і їх змін зауважимо таке:

- максимального за абсолютною величиною значення ця похибка набуває 5 липня, воно перевищує –33 мм, мінімальне (–6 мм) припадає на 7 жовтня;
- жодні закономірності сезонних змін похибки вологої складової ЗТЗ практично не проявляються. Певним винятком є липень, що вирізняється серед місяців інших сезонів високими температурами повітря і, відповідно, значним вмістом водяної пари у нижній тропосфері;
- всі значення похибки вологої складової є від’ємними, що свідчить про певне систематичне зміщення.

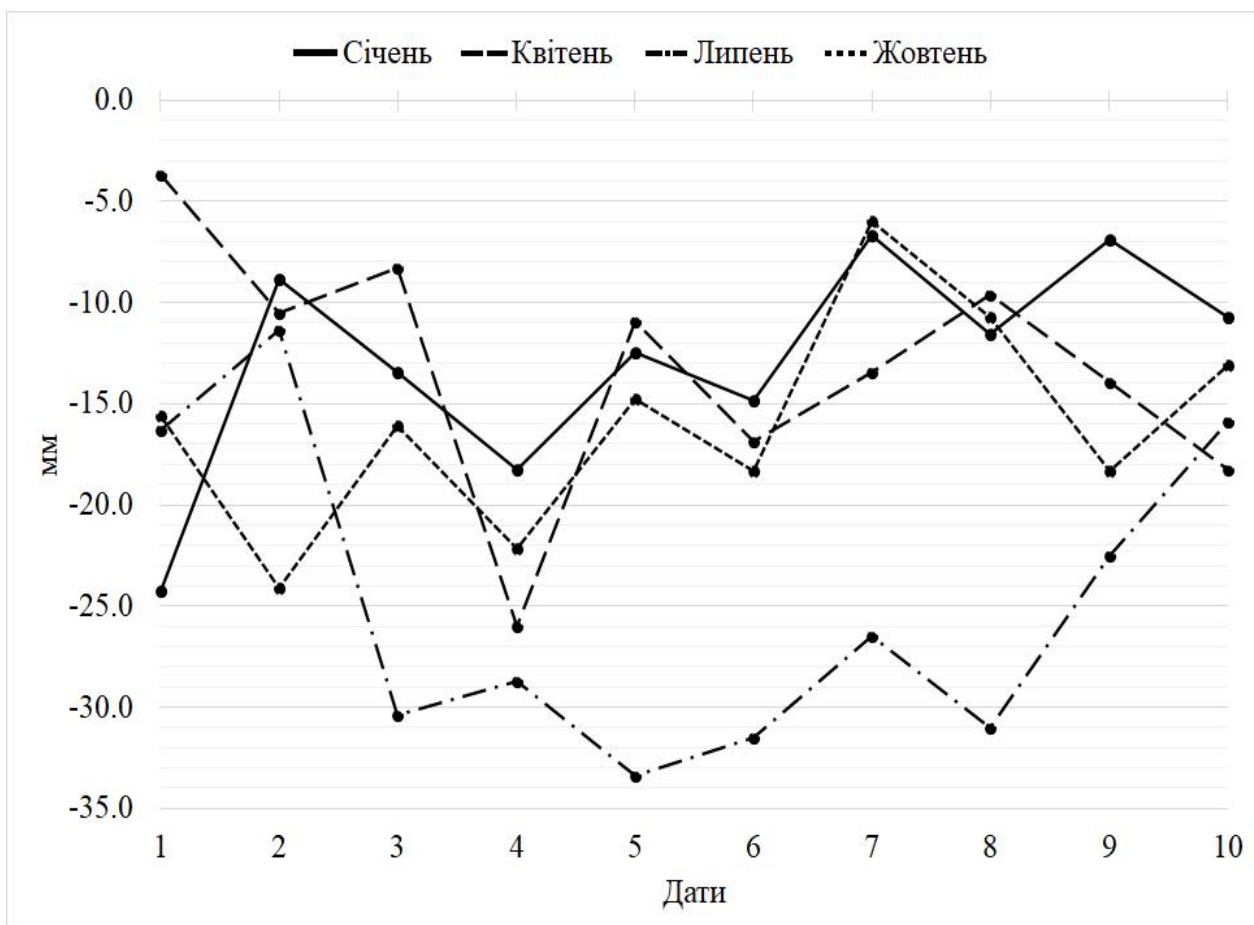


Рис. 2. Похибки $Dd_{w\text{ GNSS}}^z$ для перших декад середніх місяців сезонів

Похибки Dd_w^z GNSS для перших декад середніх місяців сезонів

Дати	Січень			Квітень			Липень			Жовтень		
	d_w^z зонд	d_w^z GNSS	Dd_w^z GNSS	d_w^z зонд	d_w^z GNSS	Dd_w^z GNSS	d_w^z зонд	d_w^z GNSS	Dd_w^z GNSS	d_w^z зонд	d_w^z GNSS	Dd_w^z GNSS
1	93,5	117,7	-24,2	32,3	36,0	-3,7	173,8	190,2	-16,3	159,4	175,0	-15,6
2	103,7	112,5	-8,8	65,7	76,2	-10,5	160,7	172,1	-11,4	116,3	140,4	-24,1
3	38,7	52,1	-13,4	64,4	72,7	-8,3	190,6	220,9	-30,4	97,1	113,2	-16,1
4	44,9	63,1	-18,2	52,4	78,4	-26,0	171,8	200,6	-28,7	115,9	138,1	-22,2
5	73,1	85,6	-12,4	102,3	113,2	-10,9	179,8	213,2	-33,4	147,3	162,1	-14,8
6	35,6	50,4	-14,8	92,2	109,0	-16,8	156,6	188,1	-31,5	102,5	120,9	-18,4
7	73,0	79,7	-6,7	64,3	77,7	-13,4	183,9	210,4	-26,5	100,6	106,6	-6,0
8	53,3	64,9	-11,6	31,3	41,0	-9,6	101,1	132,1	-31,0	62,1	72,8	-10,7
9	41,8	48,7	-6,9	36,2	50,2	-13,9	109,7	132,2	-22,5	79,0	97,3	-18,3
10	38,1	48,8	-10,7	98,6	116,9	-18,2	120,3	136,2	-15,9	76,5	89,6	-13,1

Висновки та рекомендації

У роботі проаналізовано похибки гідростатичної Dd_{hSA}^z та вологої Dd_w^z GNSS складових ЗТЗ, визначених за даними радіозондування у січні, квітні, липні й жовтні 2012 р. на аерологічній станції Praha – Libus, та зенітних тропосферних затримок, встановлених за результатами ГНСС-вимірювань на референційній станції GOPE.

Виявлено чітко виражену сезонну зміну значення похибки гідростатичної складової, починаючи від виключно додатних значень у діапазоні 2–7 мм у січні із переходом через нуль у квітні (жовтні) до суто від’ємних значень у діапазоні 3–5 мм у липні. Цього явища можна уникнути, ввівши у формулу (4) певну функціональну залежність від температури повітря. Проте ця рекомендація потребує ще детальної перевірки.

Що ж стосується похибки вологої складової ЗТЗ, то зазначимо, що вона упродовж усього року набуває лише від’ємних значень. Зауважимо, що максимальні значення (30–34 мм) цієї похибки в липні, що пояснюється порівняно високими температурами повітря, й, відповідно, значним вмістом водяної пари у нижній тропосфері у цей час. Проте виключно від’ємні значення похибки вологої складової свідчать і про систематичне зміщення її значень. Тому доцільно, на наш погляд, виконати такі самі

дослідження ще на декількох парах станцій, розміщених у Центральній і Східній Європі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Архів даних космічної геодезії NASA. <https://cddis.nasa.gov/archive/gps/products/troposphere/new/>.
- Відділ атмосферних досліджень. Університет Вайомінга. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- Заблоцький Ф. Д. До вибору моделей визначення складових зенітної тропосферної затримки при геодинамічних дослідженнях. *Геодинаміка*, 2000. № 1(3). С. 1–7. <https://science.lpnu.ua/jgd/all-volumes-and-issues/13-2000/choice-models-determination-constituents-zenith-tropospheric>.
- Заблоцький Ф. Д. ГНСС-метеорологія: навч. посіб. Львів: Вид. Львівської політехніки, 2013. 95 с.
- Заблоцький Ф., Савчук М. Точність вологої складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GPS-спостережень. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. Вип. 1. С. 52–54. <https://vlp.com.ua/node/12278>
- Каблак Н. І. Бюджет тропосферних похибок під час GPS спостережень. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. Вип. 74. С. 13–22. <https://science.lpnu.ua/uk/istcgcap/vsi-vypusky/vypusk-74-2011/byudzheth-troposfernyh-pohybok-pid-chas-gps-sposterezhen>.
- Паляниця Б. Б., Кладочний Б. В., Паляниця Х. Б. Дослідження коливань складових зенітної тропосферної затримки протягом року на території

- України. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2020. Вип. 92. С. 5–14. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.005>.
- Bevis, M. S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, 15787–15801. <https://doi.org/10.1029/92JD01517>.
- Hdidou, F. Z., Mordane, S., Sbii, S. (2018). Global positioning systems meteorology over Morocco: accuracy assessment and comparison of zenith tropospheric delay from global positioning systems and radiosondes. *Meteorological applications*, Vol. 25, iss. 4, 606–613. <https://doi.org/10.1002/met.1725>
- Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2001): GPS – theory and practice, 5th ed. Springer, Wien,
- Mendes, V. B. (1999). 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, 353. https://www.researchgate.net/profile/Virgilio-Mendes/publication/41036596_Modeling_the_Neutral_Atmosphere_Propagation_Delay_in_Radiometric_Space_Techniques/links/02e7e528cd5d4117bf000000/Modeling-the-Neutral-Atmosphere-Propagation-Delay-in-Radiometric-Space-Techniques.pdf
- Saastamoinen, J. (1972). 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., 247–251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>
- Schueler, T., Hein, G. W. (2002). Tropospheric Correction Services for GNSS Users. *Concepts, Status and Future Prospects*. University FAF Munich, Germany, 9 p.
- Zablotskyi, F. D., Palanytsia, B. B., Kladochnyi, B. V., & Nevmerzhytska, O. (2021). Accuracy estimation of the components of zenith tropospheric delay determined by the radio sounding data and by the GNSS measurements at Praha – Libus and GOPE stations. *Geodesy, cartography and aerial photography*, Vol. 94, 13–19. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.94.013>
- Zus, F., Dousa, J., Kacmarik, M., Vaclavovic, P., Balidakis, K., Dick, G., Wickert, J. (2019). Improving GNSS Zenith Wet Delay Interpolation by Utilizing Tropospheric Gradients: Experiments with a Dense Station Network in Central Europe in the Warm Season. *Remote Sens.*, Vol. 11, 674 p.

Fedir ZABLOTSKYI^{1a}, Bohdan KLADOCHNYI^{1b}, Ivanna KUTNA^{1c}

¹ Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: fedir.d.zablotskyi@lpnu.ua, bohdan.v.kladochnyi@lpnu.ua, ivanna.kutna.hd.2020@lpnu.ua,

^{1a} <https://orcid.org/0000-0003-4107-2994>; ^{1b} <https://orcid.org/0000-0003-4261-0379>

ANALYSIS OF SEASONAL CHANGES OF ZENITH TROPOSPHERIC DELAY COMPONENTS DETERMINED BY THE RADIO SOUNDING AND GNSS MEASUREMENTS DATA

The aim of the work is to analyze the change of hydrostatic and wet component values of zenith tropospheric delay (ZTD), determined for all seasons of the year. For today, ZTD components are determined mainly as follows: hydrostatic component – by using one of existing analytical models, mostly *Saastamoinen* model, and wet component – from GNSS measurements using simulated value of hydrostatic component. Also, in this study we evaluated the accuracy of the obtained values of hydrostatic and wet ZTD components for similar components, determined by radio sounding. For this purpose, we selected a pair of relatively close to each other station – aerological station and GNSS reference one. To implement the research methodology described above, we choose the Praha – Libus aerological station and the GOPE GNSS reference station. For processing and analysis, we selected the data from radio soundings of neutral atmosphere from the first station and the total values of ZTD (hydrostatic plus wet components) from the second one. Such data were selected monthly from the 1st to the 10th day of 2012 at 12 o'clock Universal Time. According to the radio sounding data, we determined the hydrostatic and the wet components of ZTD (set as reference) and the same number of total values of ZTD, derived for the same hour from GNSS measurements at the GOPE reference station. Based on these data, we determined the values of wet component of ZTD and compared

them with the corresponding data, obtained from radio soundings. We found that the error of the hydrostatic component has a clear seasonal change ranging from only positive values in the range of 2–7 mm in January with a change cross zero in April (October), reaching only negative values in the range of 3–5 mm in July. As for the error of the wet component of ZTD, it should be noted that it takes only negative values during the year without clear seasonal course. Note that maximum absolute value of this error is in July, which exceeds 30 mm, due to the maximum content of water vapor in the troposphere at this time. However, only negative values of the wet component error indicate a systematic shift of its values. This paper provides recommendations for further research to improve the accuracy of determination of both hydrostatic and wet components of ZTD, as well as the reasons for seasonal changes in the accuracy of determination, especially the hydrostatic component.

Key words: zenith tropospheric delay; hydrostatic and wet components of ZTD; radio sounding of atmosphere; GNSS measurements.

Надійшла 03.03.2022 р.