УДК 528.18:629.783

Б. КЛАДОЧНИЙ^{1*}, Б. ПАЛЯНИЦЯ¹

^{1*} Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта bohdan.kladochnyi.mhd.2019@lpnu.ua, bohdan.b.palianytsia@lpnu.ua

ПОРІВНЯННЯ РІЧНИХ КОЛИВАНЬ СКЛАДОВИХ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ, ОБЧИСЛЕНИХ ІНТЕГРУВАННЯМ ТА ЗА АНАЛІТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ

Мета роботи – дослідження річних коливань складових зенітної тропосферної затримки, обчислених числовим інтегруванням за даними аерологічного зондування атмосфери та за аналітичною моделлю Saastamoinen; оцінювання точності знаходження складових затримки за моделлю Saastamoinen за вибраний період досліджень. **Методика.** Основними методами визначення тропосферної затримки є зондування атмосфери та використання аналітичної моделі. Для дослідження складових зенітної тропосферної затримки використано дані зондування атмосфери, здійсненого на чотирьох українських аерологічних станціях (Київ, Харків, Львів та Одеса) із частотою 24 год, а також приземні значення метеорологічних параметрів, які надавали метеорологічні станції із частотою 3 год в період від 1 січня до 31 грудня 2019 р. Складові зенітної тропосферної затримки обчислено інтегруванням за даними аерологічного зондування та із використанням аналітичних формул Saastamoinen. На підставі обчислених даних складено графіки порівняння значень зондування та моделі й обчислено середні квадратичні похибки визначення складових тропосферної затримки. **Результати.** Здійснено порівняння значення складових затримки на пунктах, розташованих у різних кліматичних зонах, із використанням значень атмосферного тиску, приведенного до рівня моря. Обидві складові найбільших значень прийнято на пункті Одеса. Встановлено, що річні коливання сухої складової зенітної тропосферної затримки становлять 8–20 мм, коливання вологої складової – 75–95 мм. Добові амплітуди тропосферної затримки становлять 5–6 мм влітку та 12–13 мм взимку для сухої складової та 20–30 мм влітку та 6–8 мм взимку для вологої складової. Середні квадратичні похибки визначення складових тропосферної затримки за моделлю Saastamoinen становлять у середньому 7 мм у разі визначення сухої складової та 22 мм – вологої складової. **Наукова новизна та практична значущість** полягають у тому, що на основі дослідження можна оцінити точність та доцільність використання різних методів визначення зенітної тропосферної затримки, а також оцінити динаміку зміни складових затримки та їх поведінку протягом довготривалого періоду. Результати можна використовувати для подальших досліджень тропосферної затримки та підвищення точності супутникових спостережень.

Ключові слова: зенітна тропосферна затримка; вплив тропосфери на супутникові вимірювання; методи визначення тропосферної затримки; радіозондування атмосфери; визначення складових тропосферної затримки; ГНСС-виміри.

Вступ

Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) продовжують розвиватися, з кожним роком сфера їх застосування розширюється. Як відомо, на точність супутникових систем впливає низка факторів, і одним з основних є вплив атмосфери на супутниковий сигнал.

Нейтральна атмосфера спричиняє затримку та заломлення супутникового сигналу [Mendes, Langley, 1994]. Затримку, зумовлену зосередженням у тропосфері частинок повітря та водяної пари, називають тропосферною затримкою. Відомо багато методів визначення тропосферної затримки. Найпоширеніші з них – визначення затримки за даними аерологічного зондування атмосфери, за ГНСС-вимірюваннями та за аналітичними моделями. Найточніше визначають затримку за даними аерологічного зондування, оскільки цей метод забезпечує отримання вертикального профілю атмосфери [Zablotskyi et. al. 2017].

Через складність реалізації, коштовність та недостатню кількість аерологічних станцій, на яких здійснюють зондування атмосфери, частіше використовують аналітичні методи визначення тропосферної затримки.

Питанням зменшення впливу тропосфери на супутниковий сигнал займаються багато іноземних та вітчизняних науковців. Для прикладу, в деяких публікаціях [Nistor, Buda, 2016; Foelsche, Kirchengast, 2001; Zablotskyi et. al., 2017] досліджено осаджувану водяну пару та водяну пару на основі значень вологої складової тропосферної затримки; у [Astudillo et. al., 2018] – використання різних програмних засобів для розрахунку впливу атмосфери; у [Mendes, Langley, 1994; Niell, 1996] розглянуто функції відображення; у [Sun, Chen et. al., 2017] розроблено глобальну модель тропосферної затримки; [Xiong, Yu, Zhao, 2019] запропонували нову модель для PPP-спостережень; [Yang, Gao et. al., 2019] – нову аналітичну модель тропосферної затримки. У

[Пазяк, Заблоцький, 2015] порівняно значення тропосферної затримки, обчисленої за даними зондування та виведеної із GNSS-вимірів, а у [Savchuk, Kablak et. al., 2018] обчислено добові значення тропосферної затримки на кількох пунктах у районі Карпат.

Вихідні дані

Радіозондування атмосфери здійснюється на аерологічних станціях, які забезпечують інформацію про вертикальні профілі атмосферного тиску, температури та вологості повітря. Для визначення модельних значень складових зенітної тропосферної затримки використано дані метеорологічних станцій, розташованих на території України. В Україні, зокрема, нараховується дев'ять аерологічних станцій. Для дослідження вибрано чотири станції – Київ (UKKK), Львів (UKLL), Харків (UKHN) та Одеса (UKOO). Координати цих станцій наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Координати аерологічних станцій

Пункт	Координати		
	B, °	L, °	H, м
UKKK	50,40	30,56	167,0
UKLL	49,81	23,95	323,0
UKHN	49,96	36,13	155,0
UKOO	46,43	30,76	42,0

Пункти для дослідження вибрано з урахуванням їх розташування на території України [Palanytsia, Kladochnyi, 2020]. Вибрано пункти, розміщені в різних кліматичних зонах зі своїми особливостями.

Дані радіозондування надає ресурс [University of Wyoming Department of Atmospheric Science]; отримано вертикальні профілі основних метеорологічних параметрів для кожної станції із частотою 24 год (за винятком випадків, коли зондування проведено нижче за відмітку 20 000 м) із 1 січня до 31 грудня 2019 р. Профілі атмосфери доповнено значеннями Стандартної атмосфери до відмітки 80 км.

Приземні значення атмосферного тиску, температури та вологості повітря надають метеорологічні станції із частотою 3 год із інтернет-ресурсу [Raspisaniye Pogodi Ltd.].

Методика

Тропосферну затримку прийнято розглядати як суму сухої d_d^z (гідростатичної) та вологої d_w^z (негідростатичної) складових [Заблоцький, 2015]:

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

Одним із методів обчислення тропосферної затримки та її складових є метод інтегрування за даними аерологічного зондування атмосфери, [Заблоцький, 2000]:

$$d_{trop}^z = 10^{-6} \int_{H_s}^{h_s} N_d dH + 10^{-6} \int_{H_s}^{h_w} N_w dH, \quad (2)$$

де H_s – висота пункту спостереження над рівнем моря; h_d – висота шару сухого повітря; h_w – висота шару

атмосфери, яка містить водяну пару; N – індекс показника заломлення; dH – висота поточного прошарку атмосфери.

Тропосферну затримку можна обчислити для різних значень зенітної віддалі, використовуючи функції відображення [Niell, 1996]. Ми розраховували лише значення затримки в зеніті. Використовуючи формулу (2), було обчислено значення складових зенітної тропосферної затримки для чотирьох пунктів за 2019 р.

Для обчислення складових тропосферної затримки за приземними значеннями метеорологічних параметрів використано аналітичні формули, зокрема формули Saastamoinen [Saastamoinen J., 1972], які дають можливість отримати надійні значення тропосферної затримки для нашого регіону.

Формула Saastamoinen для сухої складової зенітної тропосферної має такий вигляд [Saastamoinen J., 1972]:

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

а для вологої:

$$d_w^z = 0.002277 \times \frac{e}{T_s} + 0.05 \frac{e}{T_s^2} e_0. \quad (4)$$

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.

Далі, як у [Кладочний та ін., 2018], за формулами (3) та (4) обчислено складові тропосферної затримки для чотирьох пунктів.

Результати досліджень

На основі отриманого масиву даних приземних значень атмосферного тиску, температури та вологості повітря за аналітичними формулами Saastamoinen обчислено складові тропосферної затримки та побудовано графіки (рис. 1–4) їхньої зміни із частотою значень 3 год упродовж 2019 р. та графіки із усередненими значеннями складових протягом кожного місяця 2019 р. (рис. 5–8).

На цих самих графіках, із синхронізацією часу спостережень, нанесено значення складових тропосферної затримки, які обчислено за даними радіозондування атмосфери із частотою 24 год. На підставі цих графіків можна зробити висновок, що точність моделі Saastamoinen доволі висока у разі визначення сухої складової та становить у середньому 3–7 мм (в окремих випадках до 12 мм). Однак точність визначення вологої складової набагато нижча, в середньому 13–23 мм (в окремих випадках до 37 мм). Зумовлено це тим, що температура та вологість повітря у вертикальному профілі змінюються швидко та нерівномірно, як у

аналітичній моделі, побудованій лише за приземними значеннями метеорологічних величин.

Середні значення різниць для кожного пункту наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Середні значення різниць між даними зондування та модельними значеннями

Пункт	Суха складова, мм	Волога складова, мм
Київ	7,0	23,9
Харків	7,5	21,7
Львів	6,4	21,1
Одеса	6,2	23,6

Хоча модельні значення менш точні, проте їх зручніше застосовувати для дослідження короточасних змін зенітної тропосферної затримки, оскільки приземні значення метеорологічних параметрів можна отримувати з більшою частотою, ніж дані зондування. Завдяки цьому на графіках можна простежити динаміку зміни складових, особливо вологої, що протягом дня змінюється із порівняно великою амплітудою.

Суха складова протягом доби із найбільшою амплітудою змінювалась на всіх пунктах улітку, із коливаннями в межах 12,2–13,54 мм. Найменші коливання складової спостерігались взимку, в межах 4,8–6,1 мм. Волога складова із більшою динамікою також змінювалась у літній період. Протягом дня значення змінювались з амплітудою 20,3–30,1 мм. У зимовий період зміни вологої складової становили 6,7–12,0 мм.

На рис. 5–8 помітно, що суха складова найбільших значень набуває у зимовий період, а найменших – влітку. Різниці між значеннями сухої складової влітку та взимку становлять у середньому 8–20 мм залежно від пункту спостереження.

Волога складова протягом року змінюється зі значно більшою амплітудою, ніж суха, та найбільших значень набуває у теплий період року (з травня до вересня). Динаміка зміни складової упродовж року в середньому становить 75–95 мм.

У табл. 3–6 подано різниці між середньомісячними значеннями зенітної тропосферної затримки, визначеними за аналітичною моделлю Saastamoinen та даними радіозондування, а також середні квадратичні похибки визначення складових за моделлю Saastamoinen відносно значень, отриманих за даними зондування атмосфери. СКП складових затримки визначено за формулою Гаусса:

$$m_{d,w} = \sqrt{\frac{[dd_{d,w}dd_{d,w}]}{n}} \quad (5)$$

Таблиця 3

Різниці між середньомісячними значеннями моделі та зондування, Київ

№	Суха складова	Волога складова	СКП	
			суха	волога
1	–13,4	–8,9	13,1	13,7
2	0,5	–19,2	8,4	18,9
3	–7,5	–6,4	8,9	13,1
4	–1,7	–9,3	6,3	16,5
5	1,3	–24,8	3,9	28,3
6	8,2	–28,0	8,7	32,3
7	6,7	–39,2	6,9	31,0
8	6,0	–23,2	6,4	29,2
9	4,1	–24,9	5,4	23,9
10	0,4	–15,6	2,6	20,5
11	4,3	–25,0	5,2	28,1
12	–8,9	–23,5	8,4	31,5

Таблиця 4

Різниці між середньомісячними значеннями моделі та зондування, Львів

№	Суха складова	Волога складова	СКП	
			суха	волога
1	–15,5	–11,0	10,2	15,2
2	–12,6	–8,0	9,7	18,6
3	–11,1	2,2	7,3	12,6
4	–3,3	–21,4	3,2	23,7
5	0,7	–8,7	2,6	12,1
6	6,4	2,2	7,3	25,7
7	5,5	–20,6	6,6	24,8
8	8,5	–13,1	7,7	32,1
9	1,3	–10,7	3,9	25,6
10	–0,2	–0,3	2,2	22,1
11	–6,8	–13,3	5,7	25,4
12	–10,3	–4,6	10,2	15,4

Таблиця 5

Різниці між середньомісячними значеннями моделі та зондування, Харків

№	Суха складова	Волога складова	СКП	
			суха	волога
1	13,0	–18,8	8,7	19,2
2	–3,0	–14,7	4,9	16,7
3	0,9	–7,5	3,2	10,7
4	2,1	–16,3	3,6	16,2
5	9,0	–13,1	9,1	18,5
6	13,2	–21,9	13,3	22,7
7	12,0	–22,3	12,6	22,9
8	11,5	–28,2	12,3	31,3
9	7,5	–34,2	8,1	37,2
10	4,4	–17,5	5,0	21,9
11	–1,3	–19,7	5,0	25,9
12	–2,5	–19,9	4,9	17,2

Таблиця 6

Різниці між середньомісячними значеннями моделі та зондування, Одеса

№	Суха складова	Волога складова	СКП	
			суха	волога
1	-11,4	-23,2	12,6	16,5
2	-11,8	-21,6	5,5	19,0
3	–	–	–	–
4	-2,7	-11,0	2,8	18,2
5	4,3	-2,8	5,2	19,3
6	9,4	-30,2	8,9	26,9
7	5,3	-19,8	6,0	28,0
8	7,5	-28,8	9,3	36,5
9	2,1	-3,6	4,8	19,9
10	-6,3	13,7	3,2	24,0
11	3,2	-26,0	3,4	35,6
12	-1,4	-13,0	6,2	15,5

Враховуючи значення, наведені в табл. 3–6, можна вказати на те, що середньомісячні значення зенітної

тропосферної затримки, обчисленої за даними зондування атмосфери та за приземними значеннями метеорологічних параметрів, із використанням моделі Saastmoinen, доволі близькі та коливаються залежно від пори року.

Середні квадратичні похибки визначення складових затримки коливаються у межах 2,2–13,1 мм для сухої складової та 10,7–36,5 мм для вологої. Можна зауважити, що СКП визначення сухої складової взимку більші, ніж влітку. Із вологою складовою ситуація протилежна – значення СКП більші влітку, ніж взимку. Якщо розглядати середні значення СКП для різних пунктів, то вони для усіх пунктів приблизно однакові.

Для визначення добових коливань складових зенітної тропосферної затримки обчислено різниці між значеннями складових, отриманими у той самий час доби кілька днів підряд протягом 2019 р. Встановлено, що добові амплітуди зміни сухої складової упродовж року коливаються в межах 5–13 мм, а вологої – 7–30 мм. Детальніше добові коливання складових на чотирьох пунктах залежно від пори року подано в табл. 7.

Таблиця 7

Амплітуди добових змін складових зенітної тропосферної затримки, мм

Сезон/ складові	Київ		Львів		Одеса		Харків	
	суха	волога	суха	волога	суха	волога	суха	волога
Зима	13,2	8,4	13,5	8,0	12,5	12,0	12,2	6,7
Весна	9,8	15,5	9,8	14,9	8,0	13,5	9,6	14,8
Літо	5,1	25,4	4,8	20,3	5,2	30,1	6,1	23,7
Осінь	8,0	16,8	8,5	17,1	7,0	20,3	8,0	16,4

На рис. 9 подано порівняння середньомісячних значень складових тропосферної затримки на чотирьох пунктах. Волога складова, як видно з графіка, найбільших значень набуває на пункті Одеса, що зумовлено його розташуванням поблизу моря, де спостерігаються вищі річні температури та вологість повітря. Найнижчі значення на пункті Харків, який розташований у степовій зоні, що характеризується посушливим кліматом.

Для побудови графіка із сухою складовою використано значення атмосферного тиску, приведені до рівня моря, оскільки атмосферний тиск зменшується із висотою і це не дає змоги оцінити різницю у коливаннях атмосферного тиску на пунктах зі значними різницями

висоти. На цьому графіку бачимо, що суха складова, якщо усунути вплив висоти станції, чітко не залежить від розташування пункту.

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна полягає у тому, що на основі дослідження можна оцінити точність та доцільність використання різних методів визначення зенітної тропосферної затримки, а також оцінити динаміку зміни складових затримки та їх поведінку протягом довготривалого періоду. Результати можна використовувати для подальших досліджень тропосферної затримки та підвищення точності супутникових спостережень.

Рис. 1. Порівняння модельних значень та зондування на станції Київ

Рис. 2. Порівняння модельних значень та зондування на станції Харків

Рис. 3. Порівняння модельних значень та зондування на станції Львів

Рис. 4. Порівняння модельних значень та зондування на станції Одеса

Рис. 5. Середньомісячні значення складових тропосферної затримки на станції Київ

Рис. 6. Середньомісячні значення складових тропосферної затримки на станції Харків

Рис. 7. Середньомісячні значення складових тропосферної затримки на станції Львів

Рис. 8. Середньомісячні значення складових тропосферної затримки на станції Одеса

Рис. 9. Порівняння значень складових тропосферної затримки на чотирьох пунктах

Висновки

У роботі досліджено річні зміни складових зенітної тропосферної затримки із використанням даних зондування атмосфери та приземних значень метеорологічних параметрів.

Підтверджено, що метод визначення складових зенітної тропосферної затримки на основі метеорологічних профілів, отриманих за даними аерологічного зондування атмосфери, незважаючи на складність його застосування, є найточнішим. Цей метод найефективніший для дослідження зміни значень складових, визначених за аналітичними методами.

Визначені різниці між радіозондуванням та аналітичною моделлю Saastamoinen становлять в середньому 3–7 мм (іноді до 12 мм) для сухої складової та 12–23 мм (з окремими випадками до 37 мм) для вологої.

Визначено річні коливання складових тропосферної затримки та встановлено, що суха складова протягом року змінюється у межах 8–20 мм залежно від досліджуваної станції, а зміни вологої складової становлять 75–95 мм. Обчислено добові амплітуди зенітної тропосферної затримки. Коливання сухої складової становить у середньому 12–13 мм взимку та 5–6 мм влітку. Добові коливання вологої складової взимку становлять 6–8 мм, а влітку 20–30 мм.

Література

- Astudillo J. M., Lau L., Tang Y.-T., Moore T. (2018). Analysing the zenith tropospheric delay estimates in on-line precise point positioning (PPP) services and PPP software packages. *Sensors*, Vol. 18(2), pp. 580.
- Foelsche U., Kirchengast G. (2001). Tropospheric water vapor imaging by combination of ground-based and spaceborne GNSS sounding data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106 (D21), pp. 27221–27231.
- Ifadis, I. M., Katsoungiannopoulos, S., Pikridas, C., Rossikopoulos, D., & Fotiou, A. (2006). 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, 15.
- Mendes V. B., Langley R. B. (1994). A comprehensive analysis of mapping functions used in modeling tropospheric propagation delay in space geodetic data. *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics, and Navigation – KIS94*, pp. 87–98.
- Niell A. E. (1996). Global mapping function for the atmosphere delay at radio wavelength. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101(B2), pp. 3227–3246.
- Nistor S., Buda A. S. (2016). Determination of zenith tropospheric delay and precipitable water vapor using GPS technology. *Mathematical Modeling in Civil Engineering*, Vol. 12, pp. 21–26.
- Palianytsia B. B., Kladochnyi B. V., Palianytsia O. B. (2020). The research of short-periodic components changes of zenith throposphere delay. *Geodesy, cartography and aerial photography*, Vol. 91, pp. 11–19.
- Raspisaniye Pogodi Ltd., St. Petersburg, Russia. Acces mode: <https://rp5.ua>.
- Saastamoinen J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, Vol. 15, pp. 247–251.
- Savchuk S., Kablak N., Khoptar A. (2018). Comparison of approaches to zenith tropospheric delay determination based on data of atmosphere radio sounding and GNSS observation. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, Vol. 88, P. 24–32.
- Sun L., Chen P., Wei E., Li Q. (2017). Global model of zenith tropospheric delay proposed based on EOF analysis. *Advances in Space Research*, Vol. 60, pp. 187–198.
- University of Wyoming Department of Atmospheric Science sounding archive. Wyoming, USA. Access mode: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Xiong C., Yu L., Zhao L. (2019). Analysis on the impacts of slant tropospheric delays on precise point positioning. *Applied Sciences*, Vol. 9, p. 4884.
- Yang L., Gao J., Zhu D., Zheng N., Li Z. (2020). Improved Zenith Tropospheric Delay Modeling Using the

- Piecewise Model of Atmospheric Refractivity. *Remote Sensing*, Vol. 12(23), p. 3876.
- Zablotskyi F., Gresko Ju., Palanytsa B. (2017). 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*, Vol. 85, pp. 13–17.
- Заблоцький Ф. Д. (2000). До визначення зенітної тропосферної затримки у GPS вимірах. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, Вип. 60, С. 33–38.
- Кладочний Б. В., Паляниця Б. Б. (2018). Дослідження добових змін зенітної тропосферної затримки. *Міжнародна науково-технічна конференція GeoTerrace-2018*. Львів, Україна, 13–15 грудня 2018 р., С. 21–24.
- Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д. (2015). Порівняння вологої складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GNSS-вимірювань, з відповідною величиною із радіозондування. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, Вип. 81, С. 16–24.

B. KLADOCHNYI, B. PALIANYTSIA

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: bohdan.b.palanytsia@lpnu.ua, bohdan.kladochnyi.mhd.2019@lpnu.ua

COMPARISON OF ANNUAL CHANGES OF ZENITH TROPOSPHERIC DELAY COMPONENTS, CALCULATED ACCORDING TO THE ATMOSPHERIC SOUNDING DATA AND BY ANALYTICAL MODEL

The aim of this work is to study the zenith tropospheric delay components fluctuations according to the atmospheric sounding data and analytical model in selected period and accuracy assessment of Saastamoinen model. **Methodology.** The main methods for calculation ZTD are atmospheric sounding and using analytical models. To study ZTD components we use atmospheric sounding data conducted at 4 Ukrainian upper air stations (Kyiv, Kharkiv, Lviv, Odesa) with 24 hours frequency, as well as near-surface atmospheric variables provided by weather stations with 3 hours frequency in the period from January 1 to December 31, 2019. ZTD components were calculated by integration using sounding data, and using Saastamoinen's formulas. Based on the calculated data, created graphs comparing the values of sounding and model. Calculated the standard error of Saastamoinen model. **Results.** Compared ZTD components at points, located in different climatic zones, using the atmospheric pressure reduced to sea level. Both ZDD and ZWD are the largest at Odesa station. Annual fluctuation of ZDD are 8–20 mm and ZWD fluctuations are 75–95 mm. The daily amplitudes of ZDD are 5–6 mm in summer and 12–13 mm in winter. The daily amplitudes of ZWD are 20–30 mm in summer and 6–8 mm in winter. The standard error of Saastamoinen's model is 7 mm for ZDD and 22 mm for ZWD. **Scientific novelty and practical significance** in that the study can improve accuracy and evaluate the feasibility of using different methods for calculating ZTD, see the dynamic of change ZDD and ZWD and their behavior over a long period. The results can be used for further studies of ZTD and improving the accuracy of satellite observations.

Key words: zenith tropospheric delay; the impact of the troposphere on satellite measurements; tropospheric delay calculating methods; atmospheric sounding; calculating of tropospheric delay components; GNSS measurements.

References

- Astudillo J. M., Lau L., Tang Y.-T., Moore T. (2018). Analysing the zenith tropospheric delay estimates in on-line precise point positioning (PPP) services and PPP software packages. *Sensors*, Vol. 18(2), 580.
- Foelsche U., Kirchengast G. (2001). Tropospheric water vapor imaging by combination of ground-based and spaceborne GNSS sounding data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106 (D21), 27221–27231.
- Ifadis, I. M., Katsoungiannopoulos, S., Pikridas, C., Rossikopoulos, D., & Fotiou, A. (2006). 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, 15.
- Mendes V. B., Langley R. B. (1994). A comprehensive analysis of mapping functions used in modeling tropospheric propagation delay in space geodetic data. International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics, and Navigation – KIS94, 87–98.
- Niell A. E. (1996). Global mapping function for the atmosphere delay at radio wavelength. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101(B2), 3227–3246.

- Nistor S., Buda A. S. (2016). Determination of zenith tropospheric delay and precipitable water vapor using GPS technology. *Mathematical Modeling in Civil Engineering*, Vol. 12, 21–26.
- Palanytsia B. B., Kladochnyi B. V., Palanytsia O. B. (2020). The research of short-periodic components changes of zenith throposphere delay. *Geodesy, cartography and aerial photography*, Vol. 91, 11–19.
- Raspisaniye Pogodi Ltd., St. Petersburg, Russia. Acces mode: <https://rp5.ua>.
- Saastamoinen J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, Vol. 15, 247–251.
- Savchuk S., Kablak N., Khoptar A. (2018). Comparison of approaches to zenith tropospheric delay determination based on data of atmosphere radio sounding and GNSS observation. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, Vol. 88, 24–32.
- Sun L., Chen P., Wei E., Li Q. (2017). Global model of zenith tropospheric delay proposed based on EOF analysis. *Advances in Space Research*, Vol. 60, 187–198.
- University of Wyoming Department of Atmospheric Science sounding archive [Interne resource]. Wyoming, USA. Access mode: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Xiong C., Yu L., Zhao L. (2019). Analysis on the impacts of slant tropospheric delays on precise point positioning. *Applied Sciences*, Vol. 9, 4884.
- Yang L., Gao J., Zhu D., Zheng N., Li Z. (2020). Improved Zenith Tropospheric Delay Modeling Using the Piecewise Model of Atmospheric Refractivity. *Remote Sensing*, Vol. 12(23), 3876.
- Zablotskyi F., Gresko Ju., Palanytsa B. (2017). 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*, Vol. 85, 13–17.
- Zablotskyi F. D. (2000). Do vyznachennia zenitnoi troposfernoi zatrymky u GPS vymirakh. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, Vyp. 60, 33–38.
- Kladochnyi B. V., Palanytsia B. B. (2018). Doslidzhennia dobovykh zmin zenitnoi troposfernoi zatrymky. Mizhnarodna nauково-tekhnichna konferentsiia GeoTerrace-2018. Lviv, Ukraina, 13–15 hrudnia 2018 r., 21–24.
- Paziak M. V., Zablotskyi F. D. (2015). Porivniannia volohoi skladovoi zenitnoi troposfernoi zatrymky, vyvedenoї iz GNSS-vymiriuvan, z vidpovidnoiu velychynoiu iz radiozonduvannia. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, Vyp. 81, 16–24.

ОСНОВА ДЛЯ НАУК ПРО ЗЕМЛЮ

- **відомості про референцні системи**
- **опис реалізації земної та небесної систем координат**
- **перетворення геодезичних координат і нормальних висот**
- **реалізація Європейської вертикальної референцної системи**
- **принципи побудови референцної висотної поверхні на основі методу скінченних елементів**

Марченко О. М., Третяк К. Р., Ярема Н. П.
Підручник.

Видавництво Львівської політехніки, 2018. 244 с.
ISBN 978-966-941-268-3