

ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.18:629.783

Б. Б. ПАЛЯНИЦЯ^{1*}, Б. В. КЛАДОЧНИЙ¹, Х. 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, bohdan.kladochnyi.mhd.2019@lpnu.ua,

² Кафедра архітектурного проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: Khrystyna.Palianytsia.AR.2019@lpnu.ua.

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.005>

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ СКЛАДОВИХ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ ПРОТЯГОМ РОКУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Мета цієї роботи – дослідити коливання складових зенітної тропосферної затримки протягом річного періоду за даними наземних метеорологічних вимірювань на території України. **Методика.** Для досліджень використано приземні значення метеорологічних величин на пунктах: Львів, Київ, Харків та Одеса, отримані в 2019 році з інтервалом у 3 години. Всього по 2920 вимірювань на кожному з пунктів. Обчислення складових зенітної тропосферної затримки виконано за формулою Саастамойнена. За обчисленими значеннями складових побудовано графіки зміни сухої та вологої складових зенітної тропосферної затримки для кожного з пунктів. Надалі обчислювалися середньомісячні та середньорічні значення складових і порівнювалися між собою. **Результати.** На основі проведених досліджень зміни значень затримки на чотирьох українських метеостанціях за період 2019 року встановлено, що середньомісячні значення складової ZHD більші на пунктах, висота яких над рівнем моря є меншою. Волога складова ZWD протягом року найбільших значень набуває в літній період. Річні коливання сухої складової ZHD мають значно меншу амплітуду, ніж вологої ZWD. Амплітуда зміни сумарної затримки визначається амплітудою зміни вологої складової, що у різних пунктах майже вдвічі більша за амплітуду зміни сухої складової, незважаючи на те, що ZWD становить усього до 10 % від величини ZTD. Отже, варіації загальної тропосферної затримки, що опосередковано відображає погодно-кліматичні процеси, зумовлені варіаціями вологої складової. **Наукова новизна та практична значущість** полягають у виявленні особливостей річної зміни складових тропосферної затримки на пунктах, що перебувають у різних кліматичних і погодних умовах. Виконані дослідження можна використовувати в задачах моніторингу крупних гідротехнічних споруд ГНСС-методами для створення регіональних моделей атмосфери та подальших досліджень тропосферної затримки, оскільки стосуються її зміни у просторі й у часі.

Ключові слова: тропосферна затримка; нейтральна атмосфера, супутникові виміри; методи визначення складових ZHD і ZWD зенітної тропосферної затримки ZTD.

Вступ

Тропосферна затримка є одним з основних чинників, що погіршують точність ГНСС-вимірів. Геодезичні методи, до яких на сьогодні активно залучають і ГНСС-технології, широко використовують для моніторингу деформацій крупних інженерних споруд, тому постійно виникає питання підвищення точності таких вимірювань за рахунок зменшення похибок та їхнього коректного врахування, зокрема і тропосферної затримки.

Міжнародна служба ГНСС – IGS, що відстежує понад 500 перманентних станцій в усьому світі, регулярно формує у форматі RINEX

добові файли, що містять загальну зенітну тропосферну затримку (ZTD). Надалі ці файли аналізують, порівнюють накопичені за різні роки, визначаючи тенденції зміни, серед них і ZTD (Jin, et al., 2007). Серед досліджуваних параметрів є сезонні коливання поправки та особливості зміни ZTD протягом багатьох років на пунктах із різними кліматичними умовами.

Дослідженнями впливу тропосфери на супутникові виміри у радіотехнічному діапазоні, до яких належать і ГНСС-виміри з сантиметровою довжиною хвиль, займалися і продовжують свої дослідження багато українських і зарубіжних науковців. Серед робіт, у яких викону-

вали дослідження сухої (ZHD) та вологої (ZWD) складових зенітної тропосферної затримки, можна виокремити такі [Mendes, 1999; Ifadis, et. al., 2006; Jin, et. al., 2007; Каблак, 2011; Заблоцький, 2001; et. al.]

Мета

Мета роботи – дослідити коливання складових зенітної тропосферної затримки протягом річного періоду за даними наземних метеорологічних вимірювань на території України.

Вихідні дані

Для дослідження річних змін складових зенітної затримки були використані дані наземних метеорологічних спостережень за 2019 рік із ресурсу [National Climatic Data Center]. Вибіралося приземні значення метеорологічних величин (температури повітря t , атмосферного тиску P та відносної вологості повітря f), отримані на пунктах: Львів, Київ, Харків і Одеса, за 2019 рік з інтервалом у 3 години. Всього по 2920 вимірювань кожної з метеорологічних величин на кожному з пунктів.

Зазначені міста, як і майже вся територія України, перебувають у зоні помірно континентального клімату, але з певними особливостями. А саме:

Львів характеризується найбільшою кількістю опадів і найнижчими літніми температурами серед усіх обласних центрів України, що спричинено чи не найменшою континентальністю місцевого клімату з-поміж великих міст України. Львівський клімат є з м'якою зимою і теплим літом. Середньомісячна температура повітря становить $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ у січні і $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ у липні. У середньому за рік випадає 740 мм атмосферних опадів: найменше – в січні, найбільше – в липні. За рік у місті в середньому припадає 174 дні з опадами.

Клімат Києва теж з м'якою зимою і теплим літом. Середньомісячні температури відрізняються: у січні нижча ніж $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, у липні вища ніж $+20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для Харкова характерною є холодна та сніжна, але мінлива зима та спекотне літо. Середня температура року становить $+6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (у січні $-6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, у липні $+20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Середня кількість опадів за рік 513 мм, найбільша – у черв-

ні та липні. Місто розташоване майже на кордоні зон лісостепу та степу, випаровуваність улітку помітно перевищує опади. Харків розташований на п'яти пагорбах і має перепад висот між верхньою і нижньою точками понад 115 метрів. Тому холодне повітря рухається з верхніх точок вниз, зазвичай у долини річок, де знижує температуру.

Клімат Одеси хоч і помірно континентальний, але має риси субтропічного, з м'якою зимою, відносно затяжною весною, теплим і довгим, нерідко спекотним літом, а також довгою та теплою осінню. Середньорічна температура повітря становить $+10,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, найнижча вона у січні ($-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), найвища – в липні ($+21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). У середньому за рік в Одесі випадає 464 мм атмосферних опадів, найменше – у жовтні, найбільше – в липні. [http://prima.franko.lviv.ua/faculty/geology/phis_geo/fourman/E-books-FVV]. У наших даних за 2019 рік значення екстремальних температур мають незначні відмінності від наведених вище значень, що отримані за багаторічними спостереженнями (табл. 1). Крім цього, у 2019 році фіксувалися температурні рекорди в окремі дні, але на цьому не акцентувалася увага, оскільки в дослідженнях відбувався пошук загальних тенденцій.

Методика

Тропосферну затримку (ZTD) прийнято розглядати як суму сухої (гідростатичної) та вологої (негідростатичної) складових:

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

Для розрахунків складових у виразі (1) використовували формули Саастамойнена [Saastamoinen J., 1972]. Для сухої складової (ZHD):

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

а для вологої (ZWD):

$$d_{wSA} = 0.002277 \cdot \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) \cdot e_0 \quad (3)$$

У формулах (2) і (3): φ і H_s – географічна широта та висота станції спостережень; T_s, P_s, e_s – приземні значення температури повітря, атмосферного і парціального тиску відповідно.

Після проведених за вказаними формулами розрахунками будувалися графіки зміни ZHD та ZWD для кожного з пунктів.

Результати досліджень

Для приземних значень основних метеорологічних параметрів T_s , P_s , e_s характерні повільні зміни, зумовлені процесами добового і сезонного ходу, та швидкі – пов'язані з турбулентністю в атмосфері.

Середньосезонні зміни атмосферного тиску порівняно невеликі. Вони становлять лише 1–3 мБар. Мінімальне значення тиску спостерігається при циклоні і досягає 935 мБар для території Євразії, що охоплює і територію України. Максимальне значення тиску становить 1050 мБар і спостерігається при антициклонах, яких буває 36 в році, тобто майже вдвічі менше, ніж циклонів. Амплітуда добових змін тиску дорівнює 0,5 мБар, але вона сильно завуальована швидкими змінами самої величини атмосферного тиску [Тверской, 1962].

Стосовно температури повітря, то вона має яскраво виражений річний хід. Характер і амплітуда річних змін залежить від властивостей підстиляючої поверхні, типів повітряних мас, особливостей атмосферної циркуляції. Амплітуда річного ходу температури за середньомісячними значеннями досягає майже 30 °С. Крім річних, температура зазнає і характерних добових змін, величина яких залежить від пори року. Максимальна амплітуда добової зміни температури спостерігається на поверхні землі. З річною і добовою зміною приземного значення температури пов'язаний характер її вертикального розподілу у нижніх шарах тропосфери [Казаков, Ломакин, 1976].

Річний хід і абсолютної, і відносної вологості загалом має простий характер (за усередненими даними): абсолютна вологість повторює хід температури, а відносна – навпаки – обернена цьому ходу. Величини їхніх річних амплітуд також відповідають значенням температури: влітку абсолютна вологість найбільша, а відносна – найменша, взимку – навпаки [Иордан В., и др. 1971].

У північних широтах відносна вологість взимку найбільша і становить 80–90 %, влітку падає до 60–70 %, а в східних областях України – до 45 %. Пружність водяної пари (e), навпаки, є малою взимку (2–3 мБар) і значно більша в літній період (середнє її значення 12–15 мБар), тож середні річні амплітуди становлять 10–12 мБар [Казаков, Ломакин, 1976].

З висотою річні коливання вологості повітря зменшуються й у верхній частині тропосфери є незначними.

Відомо, що між атмосферним тиском і висотою існує обернено пропорційна залежність. Із оцінки вихідних даних можна зауважити: що більша висота метеостанції, то меншими є отримані на ній приземні значення атмосферного тиску. Приблизно така сама тенденція мала би зберігатися і до середніх та екстремальних значень. У нашому випадку середньорічне значення атмосферного тиску за вказаний період (2019 рік) найбільше в Одесі ($h=42$ м) – 1011,3 мБар (табл. 1), а найменше у Львові ($h=42$ м) – 947,3 мБар. Загалом тиск на ст. Львів є меншим, ніж на інших пунктах, а на ст. Одеса – навпаки. Винятками не стали і два інших пункти. У Харкові середньорічне значення $P_s = 997,6$ мБар при $h=152$ м, а у Києві $P_s = 995,6$ мБар при $h=168$ м. Відповідно до цього змінюється і суха складова ZHD.

За використаними у розрахунках даними за 2019 рік середньорічне мінімальне значення температури повітря виявилось у Львові (9,9 °С), а максимальне в Одесі (12,9 °С). Температура повітря досягала максимуму в 2019 р. на ст. Одеса (34,2 °С), а мінімуму – на ст. Харків (–16,6 °С). Найбільша амплітуда річних коливань температури спостерігалася у Харкові (50,1 °С), а найменша – в Одесі (44,1 °С), що пояснюється м'якістю морського клімату.

Парціальний тиск e виявився найбільшим у Києві – 26,2 мБар, а найменшим у Харкові – 1,4 мБар. Середньорічне значення e максимальне в Одесі (11,3 мБар), а найменшим також у Харкові (9,1 мБар). Амплітуда парціального тиску змінюється від 20,8 мБар у Харкові до 24,4 мБар у Києві.

Відповідно усі ці варіації метеорологічних величин повною мірою відображаються і при формуванні величини складових ZHD і ZWD, обчислених за формулами (2) і (3).

За отриманими значеннями побудовано графіки зміни ZHD і ZWD, що показують зміну складових на пунктах із різними кліматичними особливостями протягом річного періоду (рис. 1–8).

Відомо, що сигнали ГНСС радіотехнічного діапазону під час проходження шляху від супутника до приймача через нейтральну атмо-

сферу затримуються через вплив сухого повітря та водяної пари. ZHD пропорційна приземному значенню атмосферного тиску, а ZWD – приземному значенню парціального тиску [Palianytsia, et. al., 2020; Kladochnyi, & Palianytsia, 2018; Jin, et. al., 2007; Каблак, 2011].

Надалі було обчислено середньомісячні значення сухої та вологої складових зенітної тропосферної затримки. На основі цих значень побудовано графіки (рис. 9–16). На графіках суцільними лініями показані середньорічні значення відповідних складових.

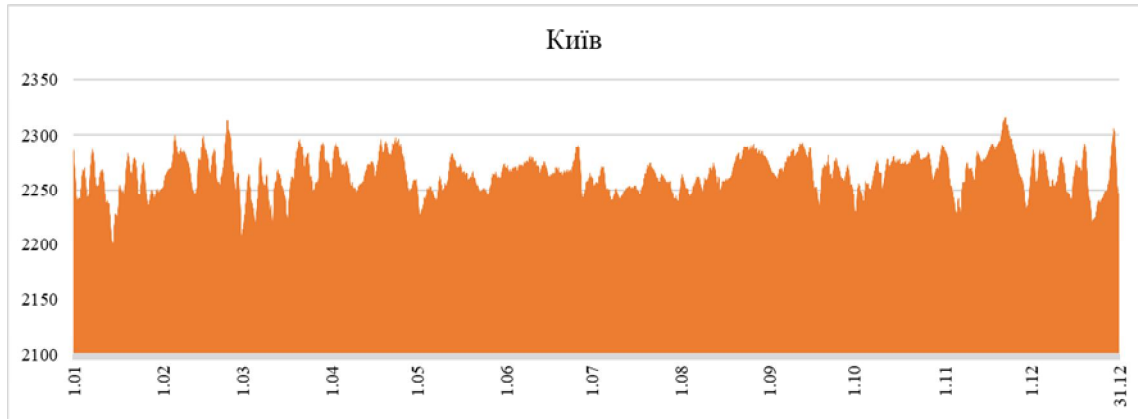


Рис. 1. Зміна складової d_h^z (в мм) на ст. Київ протягом 2019 р.

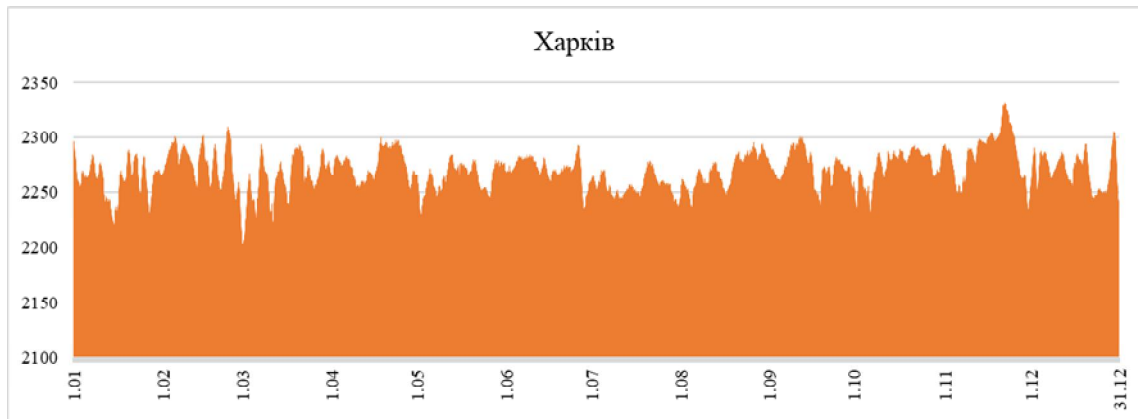


Рис. 2. Зміна складової d_h^z (в мм) на ст. Харків протягом 2019 р.

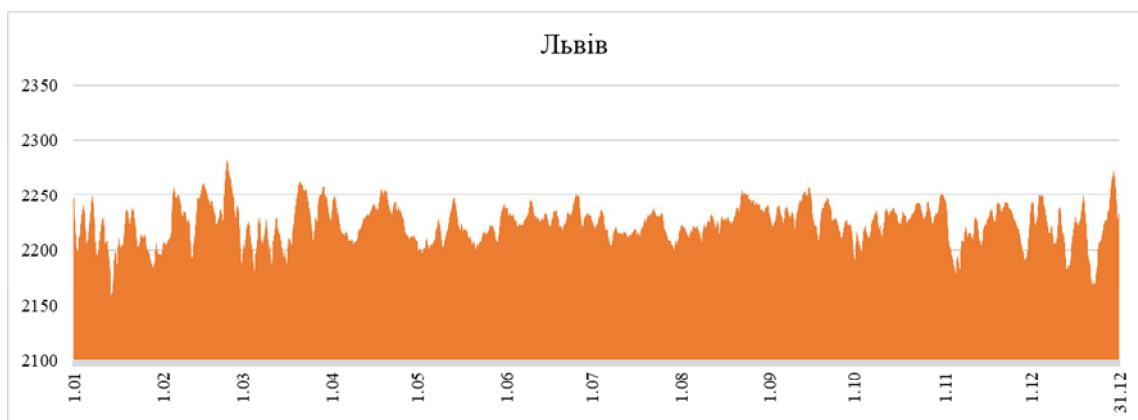


Рис. 3. Зміна складової d_h^z (в мм) на ст. Львів протягом 2019 р.

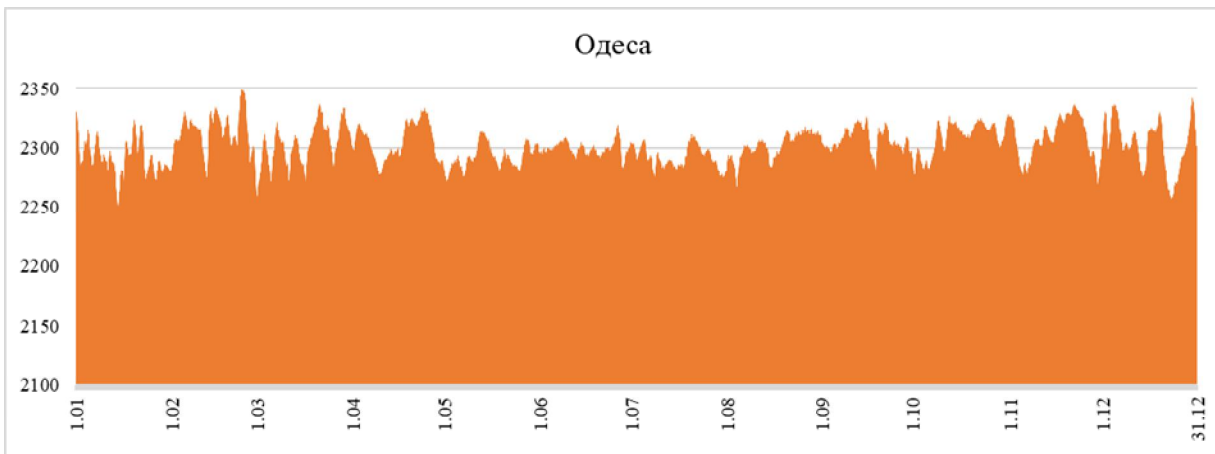


Рис. 4. Зміна складової d_n^z (в мм) на ст. Одеса протягом 2019 р.

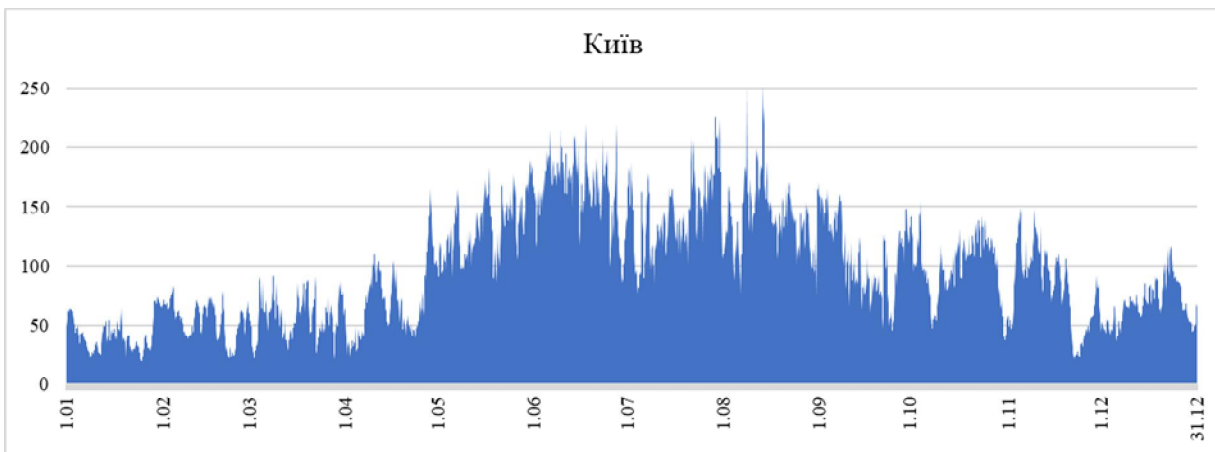


Рис. 5. Зміна складової d_w^z (в мм) на пункті Київ протягом 2019 р.

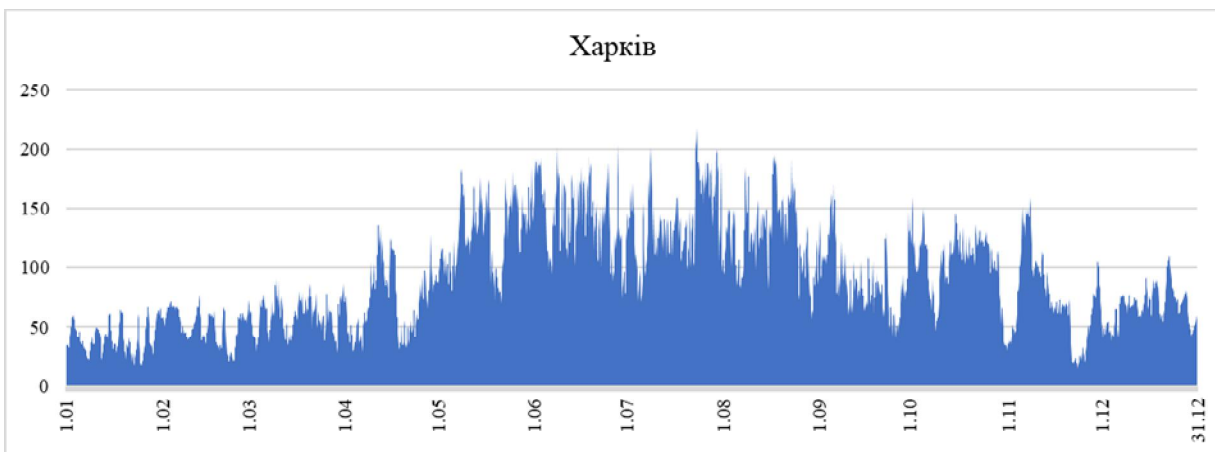


Рис. 6. Зміна складової d_w^z (в мм) на пункті Харків протягом 2019 р.

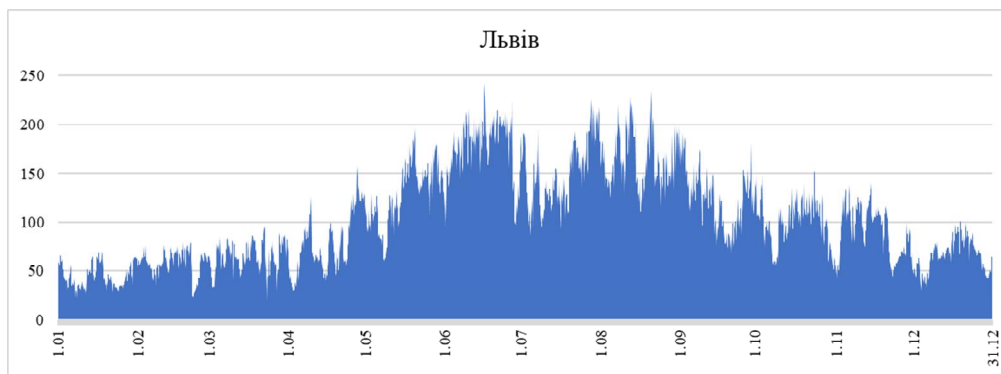


Рис. 7. Зміна складової d_w^z (в мм) на пункті Львів протягом 2019 р.

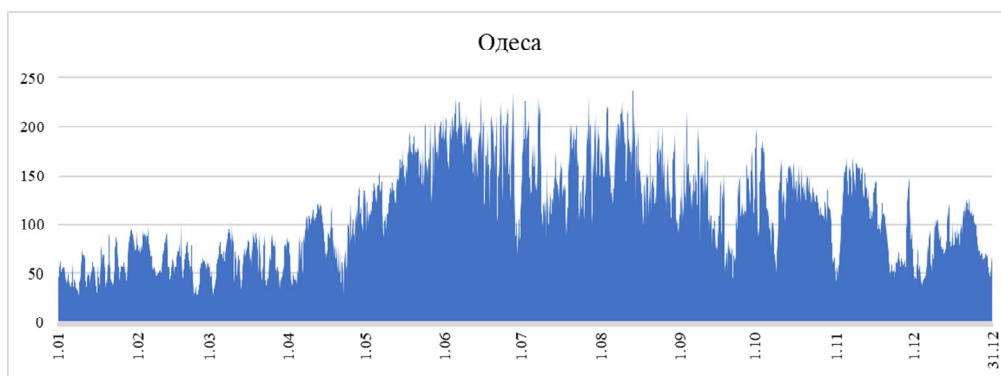


Рис. 8. Зміна складової d_w^z (в мм) на пункті Одеса у протягом 2019 р.

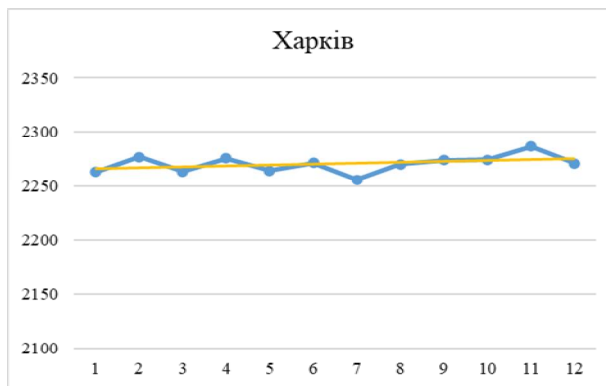
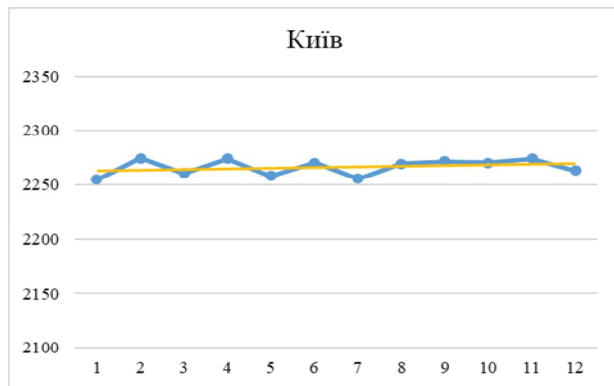


Рис. 9, 10. Середньомісячні та середньорічні значення сухої складової (в мм).

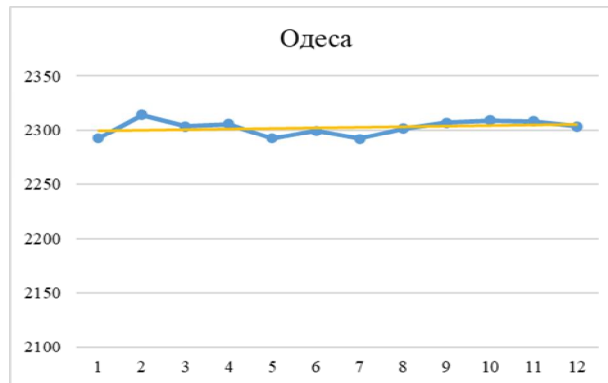
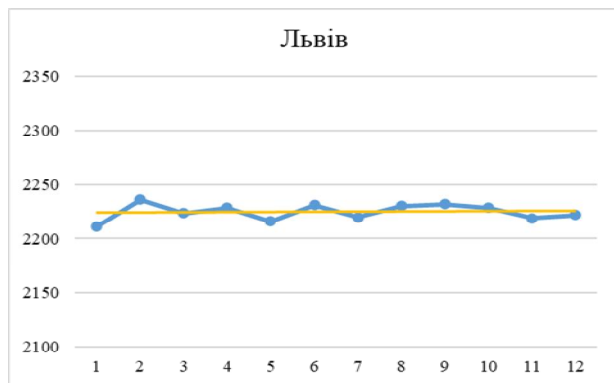


Рис. 11, 12. Середньомісячні та середньорічні значення сухої складової (в мм).

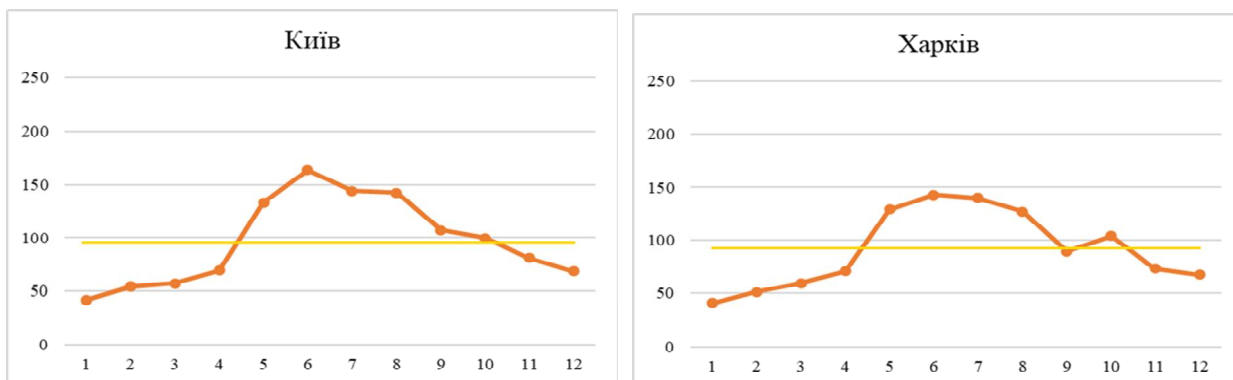


Рис. 13, 14. Середньомісячні та середньорічне значення вологості складової (в мм).

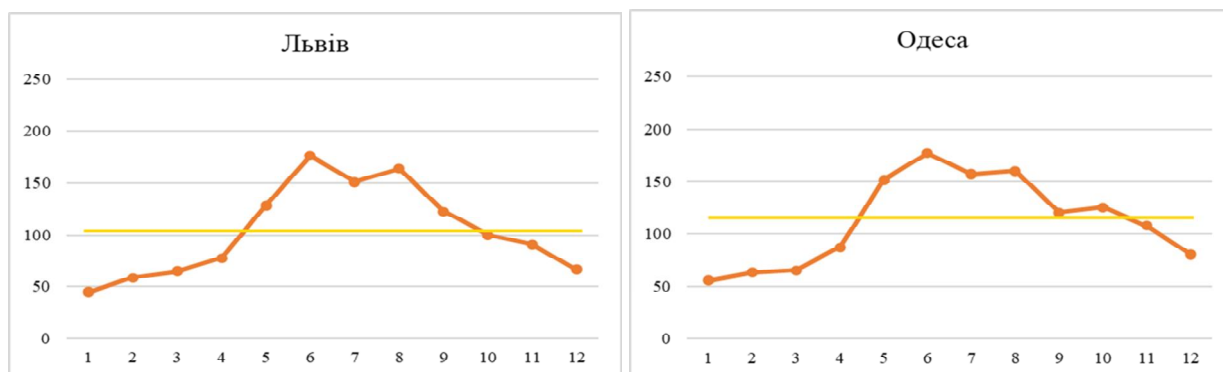


Рис. 15, 16. Середньомісячні та середньорічне значення вологості складової (в мм).

Таблиця 1

Основні характеристики метеорологічних величин та отриманих значень складових

Назва станції, висота, коорд.	Значення	P, мБар	t, °C	f, %	e, мБар	d ^{z_h} , мм	d ^{z_w} , мм
Львів	Avg.	977,4	9,9	77,9	10,3	2224,8	103,8
h = 318м	Max.	1002,4	31,8	100,0	25,6	2281,8	247,5
φ = 49,83°	Min.	947,3	-15,3	14,0	1,6	2156,1	17,9
λ = 24,03°	Max.-Min.	55,2	47,1	86,0	24,0	125,6	229,6
Київ	Avg.	995,6	10,6	70,4	9,7	2266,1	97,1
h = 168м	Max.	1017,8	34,0	100,0	26,2	2316,5	255,5
φ = 50,4°	Min.	967,1	-14,0	18,0	1,8	2201,2	20,0
λ = 30,52°	Max.-Min.	50,7	48,0	82,0	24,4	115,3	235,5
Харків	Avg.	997,6	10,3	69,6	9,1	2270,7	91,7
h = 152м	Max.	1024,3	33,5	100,0	22,2	2331,4	217,5
φ = 49,92°	Min.	968,1	-16,6	17,0	1,4	2203,4	15,2
λ = 36,23°	Max.-Min.	56,3	50,1	83,0	20,8	128,1	202,4
Одеса	Avg.	1011,3	12,9	71,8	11,3	2302,5	112,9
h = 42м	Max.	1032,0	34,2	100,0	25,9	2349,7	249,8
φ = 46,43°	Min.	988,4	-9,9	17,0	2,5	2250,4	27,4
λ = 30,73°	Max.-Min.	43,6	44,1	83,0	23,4	99,3	222,4

Проаналізувавши отримані часові ряди, можна зазначити, що річна зміна сухої складової ZHD має значно меншу амплітуду, ніж вологої ZWD.

На графіках видно, що ZHD більших значень набуває в зимовий період, а також перші місяці весни та останні осені. Це добре видно на пунктах Київ та Одеса. На інших пунктах ця зміна не така помітна. Середні значення складової найбільші в Одесі, що пояснюється найменшою висотою станції – $h=42$ м. Найменше середнє значення ZHD на пункті Львів – 2224,8 мм, де станція розташована на висоті $h=318$ м і це найвища серед досліджуваних.

Волога складова ZWD, на відміну від ZHD, найбільших значень набуває влітку (а точніше – від початку травня до листопада). Зміни ZWD більш відчутні, ніж зміни ZHD. Вона може змінюватись за нетривалий час до 200 мм, натомість короткоперіодичні зміни ZHD у різні періоди року практично не перевищують 50 мм.

Найбільше значення ZWD виявлено на пункті Одеса (112,9 мм) а найменше – на пункті Харків (91,7 мм). На двох інших пунктах значення менші, але спостерігаються тимчасові зростання до 250 мм у літній період. Для вологої складової характерне зменшення величини у середині літа. Це зумовлено змінами погодних умов у цей період, а саме – зниженням температури повітря та відносною вологістю.

Отримані результати порівняли із результатами, отриманими в [Паляниця та ін., 2016]. Відмінність полягає у тому, що у представленій роботі дані взято набагато більше, оскільки дискретність збору даних – 3 години, але лише приземні значення метеорологічних величин (за 2019 р). У [Паляниця та ін., 2016] вибиралися дані аерологічного зондування за 10 днів на кожен місяць й у нічний час (протягом 2015 р.) Отже, для отримання середньомісячних значень виконувалося усереднення за 10 днів.

Із порівняння середньорічних значень ZHD і ZWD за 2019 і 2015 роки можна зауважити, що:

- різниця середньорічних значень ZHD у Києві становить 8,9 мм, у Львові – 7,7 мм, в Одесі – 4,9 мм;

- різниця середньорічних значень ZWD у Києві становить 4,3 мм, у Харкові – 10,0 мм, у Львові – 5,8 мм, в Одесі – 1,3 мм;

- загалом середньорічні значення ZHD і ZWD за 2019 виявилися меншими, ніж у 2015 році з огляду на погодні умови.

Варіації загальної тропосферної затримки, що опосередковано відображають погодно-кліматичні процеси, зумовлені варіаціями вологої складової. Амплітуда зміни сумарної затримки визначається амплітудою зміни вологої складової, що у різних пунктах майже вдвічі більша за амплітуду зміни сухої складової. Те саме підтверджують і графіки середньомісячних значень ZHD і ZWD. Оскільки масштаби вертикальних осей на графіках однакові, то очевидним є вплив ZWD на зміну ZTD, незважаючи на те, що ZWD становить до 10 % від величини ZTD.

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна полягає у виявленні особливостей річної зміни складових тропосферної затримки на пунктах, що перебувають у різних кліматичних і погодних умовах.

Практична значущість виконаних досліджень полягає у тому, що їх можна використовувати у задачах моніторингу крупних гідротехнічних споруд ГНСС-методами для створення регіональних моделей атмосфери та подальших досліджень тропосферної затримки, оскільки стосуються її зміни у просторі й у часі.

Висновки

На основі проведених досліджень зміни значень затримки на чотирьох українських метеостанціях за 2019 рік можна зауважити, що середньомісячні значення складової ZHD є більші на пунктах, висота яких над рівнем моря є меншою.

Волога складова ZWD протягом року набуває найбільших значень у літній період.

Річні коливання сухої складової ZHD мають набагато меншу амплітуду, ніж вологої ZWD.

Амплітуда зміни сумарної затримки визначається амплітудою зміни вологої складової, що у різних пунктах майже вдвічі більша за амплітуду зміни сухої складової.

літуду зміни сухої складової, незважаючи на те, що ZWD становить до 10 % від величини ZTD.

Отже, варіації загальної тропосферної затримки, що опосередковано відображає погодо-кліматичні процеси, обумовлені варіаціями вологої складової.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Заблюцький Ф. Д. Визначення і оцінка складових тропосферної затримки у GPS вимірах. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 2001. Вип. 61. С. 11–23.
- Иордан В., Эггерт О., Кнейссль М. Руководство по геодезии. М.: Недра, 1971. 624 с.
- Каблак Н. Бюджет тропосферних похибок під час GPS спостережень. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 2011. Вип. 74. С. 13–23.
- Казаков Л. Я., Ломакин А. Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976. 165 с.
- Кладочний Богдан, Паляниця Богдан Дослідження добових змін зенітної тропосферної затримки. Міжнародна науково-технічна конференція GeoTerrace-2018. Львів, Україна, 13–15 грудня 2018 р. С. 21–24.
- 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.
- Тверской П. Н. Курс метеорологии (физика атмосферы). Л.: ГИМИЗ, 1962. 700 с.
- Ifadis I. M., Katsoungiannopoulos S., Pikridas C., Rosikopoulos 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 p.
- National Climatic Data Center, Asheville, North Carolina, USA. Інтернет ресурс [Режим доступу]: ncdc.noaa.gov.
- Palianytsia B. B., Kladochnyi B. V., Palianytsia O. B. Research of short-periodic changes in the components of zenith throposphere delay. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2020, issue 91, pp. 11–19.
- 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.
- Shuanggen Jin, Jong-Uk Park, Jung-Ho Cho, and Pil-Ho Park: Seasonal variability of GPS-derived zenith tropospheric delay(1994–2006) and climate implications. *Journal of geophysical research*, vol. 112, d09110, doi:10.1029/2006jd007772, 2007. http://prima.franko.lviv.ua/faculty/geology/phis_geofourman/E-books-FVV/

B. B. PALIANYTSIA^{1*}, B. V. KLADOCHNYI¹, KH. B. PALIANYTSIA²

^{1*} Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 14 S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: bohdan.b.palianytsia@lpnu.ua, bohdan.kladochnyi.mhd.2019@lpnu.ua,

² Department of Architectural Design, Lviv Polytechnic National University, 14 S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: Khrystyna.Palianytsia.AR.2019@lpnu.ua.

RESEARCH OF OSCILLATIONS IN THE COMPONENTS OF ZENITH TROPOSPHERIC DELAY DURING THE YEAR IN UKRAINE

The aim of this work is to study the fluctuations of the components of the zenith tropospheric delay during the annual period according to ground meteorological measurements in Ukraine. **Method.** The surface values of meteorological values at the stations: Lviv, Kyiv, Kharkiv and Odesa, obtained in 2019 with an interval of 3 hours were used for research. A total of 2920 measurements at each of the stations. The calculation of the components of the zenith tropospheric delay was performed according to the Saastamoinen formula. According to the calculated values of the components, graphs of changes in the dry and wet components of the zenith tropospheric delay for each of the stations are constructed. Subsequently, the monthly average and annual average values of the components were calculated and compared with each other. **Results.** Based on studies of changes in delay values at four Ukrainian meteorological stations for the period of 2019, it was found that the monthly average values of ZHD component are

higher at stations whose altitude is lower. The wet component of ZWD during the year acquires the greatest values in the summer. Annual fluctuations of the dry component of ZHD have a much smaller amplitude than the wet ZWD. The amplitude of the change in the total delay is determined by the amplitude of the change of the wet component, which at different stations is almost twice the amplitude of the change of the dry component, although ZWD is only up to 10 % of ZTD. Thus, variations in the total tropospheric delay, which indirectly reflects the weather and climatic processes due to variations in the wet component. **Scientific novelty and practical significance** consist in identifying the features of the annual change in the components of tropospheric delay at stations in different climatic and weather conditions. The performed research can be used in the tasks of monitoring large hydraulic structures by GNSS methods to create regional models of the atmosphere and further studies of tropospheric delay, as they relate to its changes in space and time.

Key words: tropospheric delay; neutral atmosphere, satellite measurements; methods for determining the components of ZHD and ZWD zenith tropospheric delay ZTD.

Надійшла 26.09.2020