

УДК 629.056.88+551.51

ОСОБЛИВОСТІ ВЕРТИКАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ВОЛОГОЇ СКЛАДОВОЇ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ В СЕРЕДНІХ І ТРОПІЧНИХ ШИРОТАХ

М. Пазяк, Ф. Заблоцький

Національний університет “Львівська політехніка”

Ключові слова: ГНСС-вимірювання, волога складова ЗТЗ, аерологічне зондування, водяна пара.

Вступ

Атмосферне повітря – природна суміш газів, яку можна розділити на сухе та вологе повітря (тобто таке, в якому міститься водяна пара). Саме від кількості твердих і рідких домішок та вмісту водяної пари в повітрі залежать процеси поглинання і розсіювання випромінювання. Тому поширення радіосигналу від навігаційних супутників до наземних приймачів через нейтральну атмосферу супроводжується зменшенням його швидкості. Цей процес називають тропосферною затримкою. Її прийнято поділяти на гідростатичну та вологу складові. Гідростатичну складову, яка залежить передусім від складу сухого повітря, доволі точно визначають за показниками приземних метеорологічних величин, зокрема, атмосферного тиску. Вологу складову, яка безпосередньо залежить від концентрації водяної пари в атмосфері, точно змодельовати практично неможливо через хаотичний рух водяної пари в просторі. Однак уже розроблено низку підходів та технологій, що дають змогу у певний спосіб визначати вміст та розподіл водяної пари в атмосфері, зокрема, радіозондування атмосфери, радіометри водяної пари, лідарні системи тощо. Проте вищенаведені технології мають і певні недоліки, пов’язані з дороговизною, довготривалістю вимірювань та погодними умовами, тому їх використання не завжди вигідне.

Останнім часом вміст водяної пари в атмосфері почали визначати за допомогою сигналів глобальних навігаційних супутникових систем. Оскільки ГНСС-спостереження здійснюються безперервно та не залежать від погодних умов, а мережа ГНСС-станцій добре розвинена, то такий підхід дуже зручний та економічно вигідний. Як уже зазначалось, водяна пара є основним фактором, що впливає на точність ГНСС-вимірювань,

оскільки від її концентрації в нейтральній атмосфері безпосередньо залежить величина вологої складової зенітної тропосферної затримки (ЗТЗ). Власне, саме за зворотною задачею ГНСС-вимірювань і визначають вологу складову ЗТЗ.

Тропосферну затримку досліджували протягом кількох десятиліть різні науковці. Особливості зенітної тропосферної затримки в тропічній зоні, визначеної за даними радіозондування і за аналітичними моделями, висвітлено в статтях [2, 3, 13, 14]. Аналіз ЗТЗ у середніх широтах наведено в працях [4, 5, 7, 10, 11, 15]. Однак досі не здійснено порівняння величин ЗТЗ, отриманих за даними аерологічних та ГНСС станцій розташованих як у помірних, так і в тропічних широтах.

Мета

Основна мета роботи полягає у дослідженні вертикального розподілу вологої складової зенітної тропосферної затримки на основі матеріалів радіозондування в середніх широтах та зіставлення одержаних результатів з відповідними величинами, отриманими у тропічній зоні. Виконано також порівняння цих величин з відповідними значеннями вологої складової ЗТЗ, виведеної із ГНСС-вимірювань.

Методика та результати робіт

За початкові дані у дослідженні прийнято вертикальні профілі основних метеорологічних величин (атмосферного тиску P , температури повітря t , відносної вологості U), отримані із радіозондувань за десятиденні періоди (здебільшого з 11 до 20 числа) січня та липня 2013 р. на шести аерологічних станціях [8]. Загалом вибирали станції у центрально-східному регіоні Європи, розміщені близько 50-ї паралелі. Винятком є станція Восейково (Санкт-Петербург, Росія), зміщена на 10° на північ. Аналогічні дані вибрано і для трьох станцій, розташованих в екваторіальній зоні. Координати станцій наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Координати станцій

Аерологічні станції			GNSS-станції			Країна	Відстань, км
Широта 0° 00'	Довгота 0° 00'	Висота, м	Широта 0° 00'	Довгота 0° 00'	Висота, м		
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Середні широти</i>							
Praha, 11520			GOPE			Чехія	28,0
50 00	14 27	303,0	49 54	14 47	592,6		
Kyiv, 33345			GLSV			Україна	4,0
50 23	30 33	167,0	50 22	30 30	226,8		
Legionowo, 12374			BOGI			Польща	10,9
52 23	20 57	96,0	52 28	21 02	139,9		
Budapest, 12843			BUTE			Угорщина	10,6
47 25	19 10	139,0	47 29	19 04	180,1		
Poprad, 11952			GANP			Словаччина	1,2
49 02	20 18	706,0	49 02	20 19	745,2		
Vojkovo, 26063			PULK			Росія	28,8
59 57	30 41	78,0	59 46	30 20	101,2		
<i>Тропічні широти</i>							
Guam, 91212			GUAM			США	15,8
13 28	144 47	75	13 35	144 52	201,9		
Singapore, 48698			NTUS			Сінгапур	35,4
1 22	103 59	16,0	1 20	103 40	79,0		
Pago Pago, 91765			ASPA			США	1,8
-14 20	-170 43	3,0	-14 19	-170 43	53,7		

1. Інтерполювання метеорологічних величин

Для кожної з аерологічних станцій підбирали за можливості найближчу відповідну активну референцну GNSS-станцію з відомими зенітними тропосферними затримками. Як видно з табл. 1, найменша відстань у парі між станціями становить 1,2 км, а найдовша – 35 км. Оскільки вибрані GNSS-станції розташовані найближче до сусідніх аерологічних, то можна прийняти, що вертикальні профілі основних метеорологічних величин на цих станціях однакові. Деякі автори в своїх дослідженнях використовували дані зі станцій, відстань між якими сягала наприклад, 50 км [15]; 70 км [10]; 100 км [11].

Для аналізу використано значення ЗТЗ, отримані за даними аерологічного зондування, які ми прийняли за еталонні (хоча, звичайно, відносно, тому що величина тропосферної затримки міститиме деякі незначні похибки, насамперед спричинені помилками вимірювання таких елементів величин, як атмосферний тиск, температура та вологість повітря). Оскільки максимальні висоти, яких досягли кулі-

зонди під час радіозондування на вибраних станціях, у середньому становили приблизно 35 км, то від цієї висоти до 80 км тиск та температуру вибирали зі стандартної моделі атмосфери (СМА-81) [1]. Це дає змогу найточніше обчислити повну тропосферну затримку, оскільки навіть шар 70–80 км ще дає помилку 0,1 мм за рахунок гідростатичної складової. Понад 80 км ця помилка становить 0,01 мм і менше, чим можна знехтувати.

За даними табл. 1, спостерігається значний перепад висот між аерологічними та GNSS-станціями, який коливається в межах від 23 до 290 м, що відповідає різницям атмосферного тиску від 1,8 до 23,2 гПа. Зазначимо, що оптимальна точність вимірювання атмосферного тиску становить 0,5 гПа, температури повітря 0,5 °C і відносної вологості 5 %. Оскільки сучасні радіозонди оснащені цифровими датчиками, то, врахувавши вищесказане, визначимо, які помилки вносяться у значення ЗТЗ під час радіозондування за рахунок: атмосферного тиску $P \approx -13,3$ мм; температури повітря $t \approx 2,5$ мм; а відносної вологості $U \approx -3,5$ мм. Середня квадратична

помилка ЗТЗ m становить ≈ 14 мм. Враховуючи, що атмосферний тиск P відіграє основну роль під час формування ЗТЗ, редукувати його необхідно за формулою (1) [6]. Що ж до температури повітря t і відносної вологості U , то в малих прошарках зондувань їх значення з достатньою точністю можна обчислити за лінійною інтерполяцією (формули (2) і (3)).

$$\Delta P = P_0 \exp\left[-\frac{g}{R \cdot T_m}(H_{i+1} - H_i)\right], \quad (1)$$

$$\Delta t = \frac{(H_{i+1} - H_i) \cdot (t_{i+1} - t_i)}{H_{i+1} - H_i} + t_i, \quad (2)$$

$$\Delta U = \frac{(H_{i+1} - H_i) \cdot (U_{i+1} - U_i)}{H_{i+1} - H_i} + U_i, \quad (3)$$

де g – сила тяжіння; H_{i+1} ; H_i – висоти, що обмежують шар атмосфери, в якому розміщена ГНСС-станція; T_m – середня температура повітря; R – питома газова стала сухого повітря.

У табл. 2 наведено усереднені за десятиденний період значення гідростатичної складової ЗТЗ, обчислені за даними радіозондування та моделлю Saastamoinen. Ці значення подано як з урахуванням, так і без урахування редукування атмосфери до висот відповідних ГНСС-станцій.

Таблиця 2

Усереднені значення гідростатичної складової ЗТЗ

Назва станцій	ΔH	Аерологія			Модель Saastamoinen			Мін відхилення від середніх значень	Мак відхилення від середніх значень
		сер. d_h^z		Δd_h^z	сер. d_h^z		Δd_h^z		
		Неінт.	Інт.		Неінт.	Інт.			
		Січень							
Середні широти									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Praha-Libus – GOPE	289,6	2218,0	2138,1	80,0	2217,4	2137,4	80,1	-19,5	22,1
Kyiv – GLSV	59,8	2274,5	2257,2	17,3	2267,1	2250,1	17,0	-26,4	26,1
Legionovo – BOGI	43,9	2276,2	2263,6	12,7	2274,4	2261,4	13,0	-32,0	24,8
Budapest – BUTE	41,1	2286,3	2274,6	11,7	2283,0	2271,5	11,4	-20,7	21,8
Poprad-Ganovce – GANP	39,2	2096,0	2085,6	10,4	2097,5	2087,0	10,5	-28,2	13,6
Voejkovo – PULK	23,2	2298,7	2291,8	7,0	2292,1	2285,2	6,9	-15,4	30,8
Тропічні широти									
Guam – GUAM	126,9	2284,5	2252,1	32,4	2291,9	2259,4	32,5	-4,2	3,9
Singapore – NTUS	63	2300,0	2283,7	16,3	2302,3	2286,6	15,8	-4,7	11,7
Pago Pago – ASPA	50,7	2287,2	2274,2	13,0	2294,1	2281,2	12,9	-8,1	7,8
Липень									
Середні широти									
Praha-Libus – GOPE	289,6	2241	2166,7	74,7	2243,6	2168,8	74,8	-13,7	11,2
Kyiv – GLSV	59,8	2260	2244,2	15,7	2263,0	2247,5	15,5	-18,0	10,2
Legionovo – BOGI	43,9	2289	2277,4	11,8	2292,4	2280,4	12,0	-25,7	15,2
Budapest – BUTE	41,1	2279	2268,4	10,8	2282,3	2271,6	10,7	-12,8	18,7
Poprad-Ganovce – GANP	39,2	2131	2121,5	9,6	2135,5	2125,7	9,7	-8,7	11,2
Voejkovo – PULK	23,2	2281	2274,3	6,3	2281,2	2275,0	6,1	-17,7	14,2
Тропічні широти									
Guam – GUAM	126,9	2277,4	2245,5	31,9	2286,2	2253,8	32,4	-2,7	3,4
Singapore – NTUS	63	2286,7	2270,5	16,2	2297,1	2280,4	16,7	-2,3	3,1
Pago Pago – ASPA	50,7	2298,6	2286,0	12,5	2307,1	2294,4	12,7	-2,4	4,7

У табл. 2 подано такі позначення ΔH – різниця висот між аерологічною та ГНСС-станціями; $сеп. d_h^z$ – усереднені за десятиденний період значення гідростатичної складової ЗТЗ; Δd_h^z – різниці гідростатичних складових, визначених як з урахуванням, так і без урахування інтерполяції метеорологічних параметрів.

Аналізуючи дані табл. 2, можна стверджувати, що чим більшим є вертикальне зміщення між висотами станцій, тим більша різниця між гідростатичними складовими. Якщо $\Delta H = 289,6$ м, різниця

гідростатичних складових становить $\Delta d_h^z \approx 80,0$ мм, а якщо $\Delta H = 23,2$ м відповідно $\Delta d_h^z \approx 7,0$ мм. Зазначимо, що подібні результати наведено в роботі [10]. Аналогічно отримано значення вологої складової ЗТЗ, показники подано в табл. 3.

У табл. 3 використано такі позначення: $сеп. d_w^z$ – усереднені за десятиденний період значення вологої складової ЗТЗ; Δd_w^z – різниці вологих складових, визначених як з урахуванням, так і без урахування інтерполяції метеопараметрів.

Таблиця 3

Усереднені значення вологої складової ЗТЗ

Назва станції	ΔH	Аерологія			Saastamoinen			Min відхилення від середніх значень	Max відхилення від середніх значень
		$сеп. d_w^z$		Δd_w^z	$сеп. d_w^z$		Δd_w^z		
		Неінт.	Інт		Неінт.	Інт			
		Січень							
Середні широти									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Praha-Libus – GOPE	289,6	49,5	43,9	5,7	43,0	38,8	4,2	-11,3	17,7
Kyiv – GLSV	59,8	56,7	55,7	1,0	34,7	34,7	0,0	-51,5	34,6
Legionovo – BOGI	43,9	50,1	46,8	3,3	38,7	38,7	0,0	-39,3	23,2
Budapest – BUTE	41,1	59,2	58,1	1,1	58,1	56,9	1,1	-35,3	31,0
Poprad-Ganovce – GANP	39,2	64,4	63,5	0,9	48,7	47,7	1,0	-35,7	27,9
Voejkovo – PULK	23,2	44,5	44,2	0,3	24,3	24,8	-0,4	-25,6	25,6
Тропічні широти									
Guam – GUAM	126,9	209,1	194,9	14,2	280,6	251,8	28,8	-81,7	72,8
Singapore – NTUS	63	326,0	319,2	6,7	231,9	255,1	-23,1	-76,8	47,3
Pago Pago – ASPA	50,7	325,8	319,5	6,3	299,2	277,0	22,3	-62,8	109,5
Липень									
Середні широти									
Praha-Libus – GOPE	289,6	121,6	116,6	5,0	137,5	119,6	17,9	-47,0	14,7
Kyiv – GLSV	59,8	149,5	145,7	3,9	144,8	143,9	0,9	-38,6	32,5
Legionovo – BOGI	43,9	144,7	141,9	2,8	143,2	142,8	0,4	-83,5	51,8
Budapest – BUTE	41,1	159,1	156,3	2,8	154,4	152,1	2,2	-50,5	49,2
Poprad-Ganovce – GANP	39,2	119,6	117,5	2,1	129,3	110,1	19,2	-22,0	26,8
Voejkovo – PULK	23,2	136,9	135,6	1,3	123,4	125,1	-1,7	-43,2	25,5
Тропічні широти									
Guam – GUAM	126,9	310,2	294,6	15,6	323,4	278,7	44,7	-26,7	25,8
Singapore – NTUS	63	332,6	325,1	7,5	264,6	316,9	-52,3	-35,6	76,4
Pago Pago – ASPA	50,7	284,1	278,1	6,0	303,2	269,6	33,6	-38,9	57,4

Проаналізувавши табл. 3, потрібно зауважити, що чіткої закономірності між різницями ΔH та різницями вологості складової Δd_w^z не спостерігається, хоча за даними радіозондування різниці Δd_w^z здебільшого зменшуються зі зниженням ΔH . Що ж до значень Δd_w^z отриманих за моделлю Saastamoinen, то тут є як від'ємні, так і додатні значення, а це ще раз

підтверджує, що вологу складову ЗТЗ неможливо змодельовати із задовільною точністю за аналітичними моделями.

У табл. 4 для деяких станцій подано інтерпольовані значення вологих складових ЗТЗ (на 0 год UT), отримані за даними аерологічного зондування та виведені з ГНСС-спостережень. Значення подано за десять днів січня та липня 2013 р.

Таблиця 4

Погодинні значення вологості складової ЗТЗ та їхні різниці

Kyiv–GLSV			Praha–libus–GOPE			Pago Pago–ASPA		
d_{wAER}^z	d_{wGNSS}^z	Δd_w^z	d_{wAER}^z	d_{wGNSS}^z	Δd_w^z	d_{wAER}^z	d_{wGNSS}^z	Δd_w^z
Січень, 2013								
43,9	41,7	2,2	55,1	65,3	-10,2	290,4	326,2	-35,9
48,4	47,4	1,0	26,1	36,1	-9,9	250,6	300,8	-50,2
83,1	92,4	-9,4	36,7	44,5	-7,8	365,4	370,4	-5,0
107,2	112,9	-5,8	38,4	46,5	-8,2	352,7	411,0	-58,3
42,7	43,9	-1,2	44,4	51,4	-6,9	363,8	396,3	-32,5
21,1	15,3	5,8	39,8	51,0	-11,2	382,3	428,9	-46,6
29,9	32,8	-2,9	53,9	65,3	-11,4	360,9	427,5	-66,6
52,1	56,3	-4,2	49,9	56,1	-6,2	370,7	380,9	-10,2
48,3	48,4	-0,1	51,8	65,7	-14,0	210,0	232,0	-22,0
80,1	91,7	-11,6	42,4	52,8	-10,3	248,7	285,9	-37,3
Липень, 2013								
140,2	148,7	-8,5	102,0	113,1	-11,1	277,2	320,1	-42,9
130,8	137,8	-6,9	121,4	127,1	-5,7	283,6	316,9	-33,3
184,3	217,3	-32,9	118,9	136,0	-17,1	264,6	301,1	-36,6
158,0	160,0	-2,0	116,5	129,3	-12,8	314,2	340,6	-26,4
134,8	126,9	7,9	105,1	128,0	-22,8	317,0	341,0	-24,0
176,2	176,0	0,1	108,0	127,1	-19,1	278,7	320,4	-41,7
123,4	129,8	-6,4	163,6	168,0	-4,4	302,3	345,1	-42,8
169,6	166,1	3,5	106,0	114,7	-8,7	225,3	274,3	-49,0
126,4	103,1	23,3	111,7	118,6	-6,9	297,3	352,9	-55,5
113,2	100,9	12,3	113,2	132,7	-19,5	220,7	263,3	-42,6

2. Розподіл вмісту вологої складової d_w^z за висотою

З метою аналізу висотного розподілу вмісту вологої складової d_w^z виконано її інтегрування у різних шарах тропосфери, обмежених стандартними ізобаричними поверхнями: P_0 – тиск на рівні ГНСС-станції, 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа, в.м.з. U – верхня межа зондування відносної вологості U . Для аналізу розподілу вмісту вологої складової з висотою вибрано вертикальні профілі основних метеорологічних величин, отримані із радіозондувань із нередукованими метеопараметрами, оскільки вони охоплюють нижні шари зондувань, а це, своєю чергою, дасть змогу точніше оцінити вміст вологої складової складника ЗТЗ. Отримані результати відображено на рис. 1 і 2.

З рис. 1 видно, що понад 90 % вмісту вологої складової ЗТЗ зосереджено в трьох нижніх шарах тропосфери, а саме в сумарному шарі $P_0 - 500$ гПа. Найбільше значення d_w^z припадає на шар $P_0 - 850$ гПа, окрім станції Poprad. Це безпосередньо пов'язано з висотою аерологічної станції, яка становить 706 м і є найбільшою з-поміж висот усіх інших станцій. Результати, подані на рис. 1, показують, що значення d_w^z у різних шарах тропосфери за зимовий період у середньому коливаються у межах від 2 мм у верхньому до 30 мм у нижньому. Влітку цей показник зростає практично більш ніж удвічі, що спричинено

набагато вищими температурами і відповідно вмістом водяної пари в атмосфері.

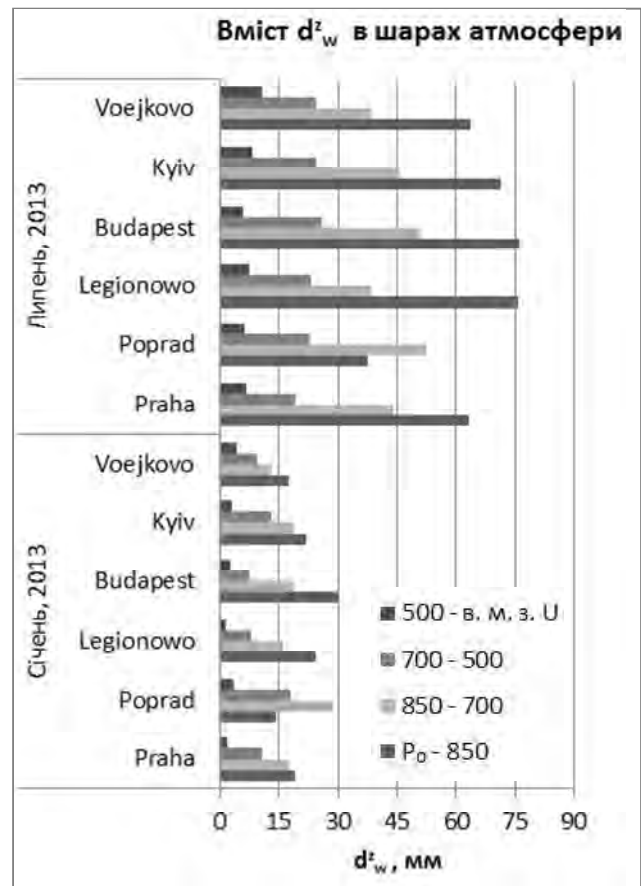


Рис. 1. Усереднені значення d_w^z у різних шарах атмосфери в середніх широтах

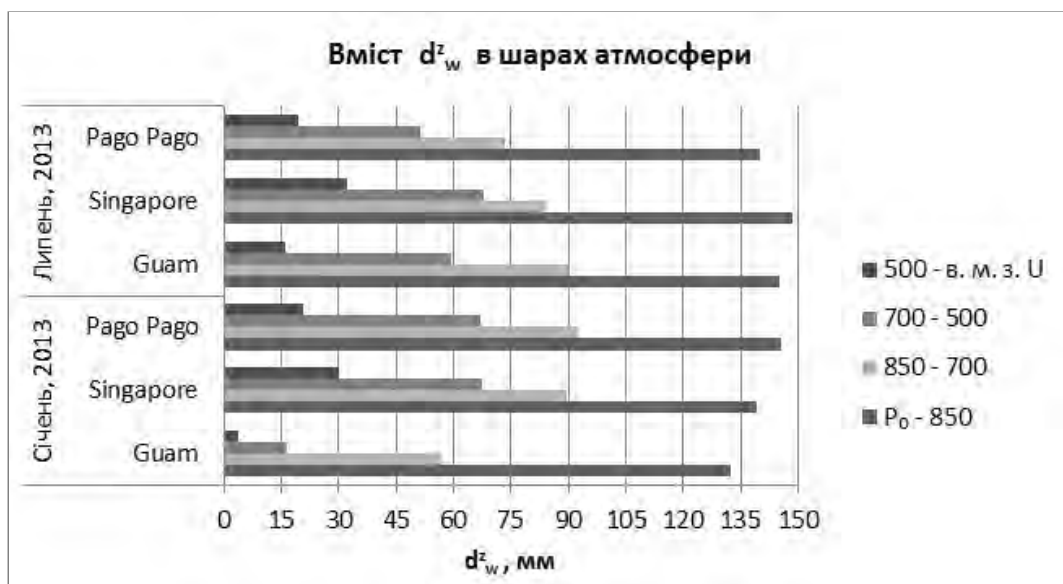


Рис. 2. Усереднені значення d_w^z у різних шарах атмосфери в тропічних широтах

Як для помірних, так і для тропічних широт характерно те, що основна частка вологої складової ЗТЗ зосереджена в трьох нижніх шарах тропосфери до

висоти близько 6 км. Однак, як видно з рис. 1, у тропічній зоні значення d_w^z як у літній, так і в зимовий період практично однакові. За відповідними шарами

вони коливаються в межах від 5 до 150 мм, та майже вдвічі перевищують показники середніх широт у липні, приблизно в чотири рази у січні. Такі стабільно великі значення d_w^z пов'язані з однотипними кліматичними умовами, як правило, з високими температурами, що притаманні тропікам впродовж року.

3. Порівняння вологих складових d_w^z , отриманих за даними радіозондування та ГНСС-вимірювань

Щоб отримати значення вологої складової d_w^z з ГНСС-вимірювань, необхідно від повної ЗТЗ відняти гідростатичну складову, обчислену, як правило, за формулою Saastamoinen ($d_{wGNSS}^z = d_{GNSS}^z - d_{hSA}^z$). Зазначимо, що значення повної ЗТЗ з часовим

інтервалом 5 хв та 1 год подано в тропосферних файлах, які створюють в центрах опрацювання ГНСС-вимірювань для кожної доби. Вони містять масив усереднених значень повної ЗТЗ і зберігаються в архівах інтернет-ресурсів, зокрема в документах [9, 12] відповідно. Для вказаних станцій такі файли завантажували на дні радіозондувань. Для об'єктивного порівняння значення d_w^z до уваги брали дані аерологічного зондування з редукованими метеорологічними величинами ($_{\text{інт.}}d_{wAER}^z$). Зауважимо, що значення dd_w^z ($dd_w^z = d_{wGNSS}^z - \text{інт.}d_{wAER}^z$) характеризують точність визначення вологої складової ЗТЗ. За отриманими результатами побудовано графіки.

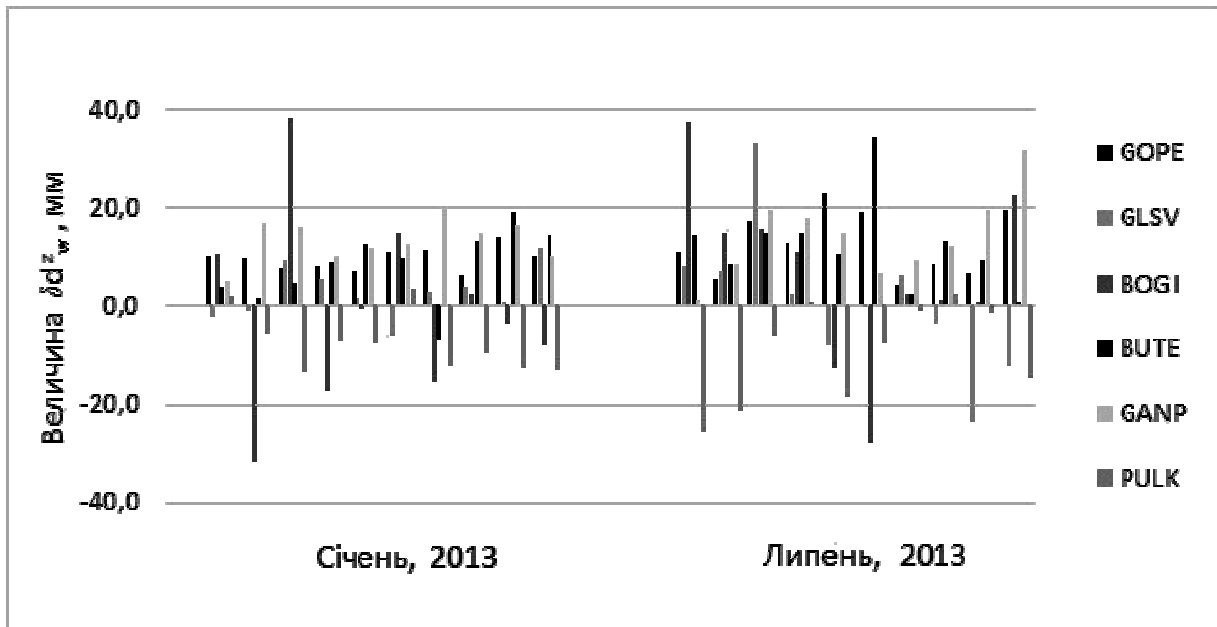


Рис. 3. Зміни значення dd_w^z за середні декади січня та липня 2013 р. у середніх широтах

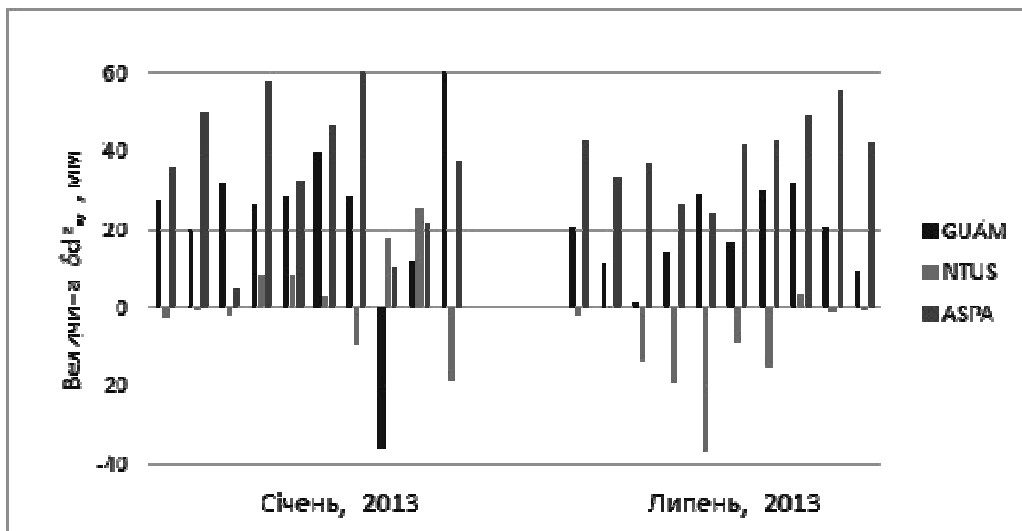


Рис. 4. Зміни значень dd_w^z за середні декади січня та липня 2013 р. у тропічних широтах

Як видно з наведених графіків, значення dd_w^z , що, як уже зазначалось, характеризують точність вологості складової, за даними станцій середніх широт є як додатними, так і від'ємними, і здебільшого коливаються у межах -20 до 20 мм. У тропічних широтах ці показники переважно додатні й у середньому сягають значення 40 мм.

Висновки

У результаті виконаних досліджень можна зробити висновки:

- Редукування метеорологічних елементів аерологічних станцій здійснюється з метою об'єктивного оцінювання значень вологості складової, отриманої як із радіозондувань, так і з ГНСС-вимірювань. Та оскільки метеорологічні елементи редукують до висот ГНСС-станцій (які зазвичай вищі за відповідні аерологічні станції), то під час редукування не враховуються нижні шари зондувань, оскільки вони обмежуються висотою ГНСС-станцій. Таке вертикальне зміщення станцій впливає насамперед на значення гідростатичної складової: якщо $\Delta H = 289,6$ м, різниця гідростатичних складових сягає $80,0$ мм, а якщо $\Delta H = 23,2$ м – $7,0$ мм.

- Результати інтегрування вологості складової за стандартними ізобаричними поверхнями показують, що як в середніх, так і в тропічних широтах лівова частка вологості складової зосереджена у трьох нижніх шарах тропосфери. Для помірних широт значення d_w^z взимку в середньому коливаються у межах від 2 мм у верхньому шарі до 30 мм у нижньому. Влітку цей показник зростає практично вдвічі, оскільки в цей час збільшується і вміст водяної пари в повітрі. У тропіках ці величини протягом року коливаються в межах від 5 до 150 мм та приблизно вдвічі перевищують показники середніх широт у липні й у приблизно у чотири рази у січні.

- Порівнявши вологі складові ЗТЗ, отримані за даними радіозондування та ГНСС-вимірювань, обчислили значення dd_w^z , що характеризують точність вологості складової. За даними станцій середніх широт вони є як додатними, так і від'ємними і здебільшого коливаються у межах -20 до 20 мм. У тропічних широтах ці показники переважно додатні й у середньому сягають 40 мм.

Надалі на основі отриманих результатів, виконавши додаткові обчислення, плануємо визначити вміст осаджуваної водяної пари в атмосфері, а також збільшити кількість досліджуваних станцій та експериментальних даних.

Література

1. ГОСТ – 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 108 с.
2. Заблоцький Ф. Д. Аналіз зенітної тропосферної затримки в тихоокеанських широтах / Ф. Д. Заблоцький, О. Ф. Заблоцька // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л.: Ліга-Прес, 2010. – Вип. I. – С. 50–55.
3. Заблоцький Ф. Д. Аналіз тропосферної затримки сигналу в екваторіальній зоні за матеріалами зондування / Ф. Д. Заблоцький, О. Ф. Заблоцька // Вісн. геодез. та картогр. – 2009. – № 6. – С. 9–11.
4. Заблоцький Ф. Д. Аналіз зенітної тропосферної затримки, визначеної в ході ГНСС-вимірювань та радіозондувань у тропічних і середніх широтах / Ф. Д. Заблоцький, М. В. Пазяк // Вісник геодезії та картографії. – К.: НДІГК, 2015. – № 3. – С. 7–9.
5. Каблак Н. І. Оцінка впливу атмосфери у мережі активних референціальних GNSS-станцій / Н. І. Каблак // Геодез., картогр. і аерофотозім. – 2010. – Вип. 73. – С. 17–21.
6. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии (Физика атмосферы): учебник / Л. Т. Матвеев – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
7. Савчук М. В. Оцінювання гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки за даними радіозондування / М. В. Савчук, Ф. Д. Заблоцький // Вісник геодез. та картогр. – 2014. – № 6 – С. 3–5.
8. Служба атмосферних досліджень при університеті Вайомінгу, Інтернет-ресурс [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
9. Тропосферні файли GNSS спостережень. Інтернет-ресурс. Режим доступу: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/troposphere/new/>
10. Boccolari M., Fazlagic S., Frontero P., Lombroso L., Pugnaghi S., Santangelo R., Corradini S. and Teggi S. GPS Zenith Total Delays and Precipitable Water in comparison with special meteorological observations in Verona (Italy) during MAP-SOP. Annals of Geophysics, October 2002, Vol. 45, No. 5. – P. 599–608.
11. Emardson T. R., G. Elgered and J. M. Johansson (1998): Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receivers // J. Geophys. Res., 103 (D2). – P. 1807–1820.
12. GNSS Data Center. Інтернет-ресурс [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>
13. Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques / V. B. Mendes // Ph. D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report № 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999. – P. 35.
14. Parameswaran K. Region-specific Tropospheric Delay Model for the Indian Subcontinent / K Parameswaran, C. Suresh Raju, Kovak Saha, Sudha

Ravindram. Space Physic Laboratory, VSSC, Trivandrum. ICG-meeting, 2007. – P. 1–13.

15. Vedel H., K. S. Mogensen and Y. Huang (2001): Calculation of zenith delays from meteorological data comparison of NWP model, radiosonde and GPS delays, Phys. Chem. Earth (A), 26 (6–8). – P. 497–582.

**Особливості вертикального розподілу
вологої складової зенітної
тропосферної затримки в середніх
і тропічних широтах**
М. Пазяк, Ф. Заблоцкий

Досліджено вертикальний розподіл вологої складової зенітної тропосферної затримки (ЗТЗ) за даними аерологічних станцій у середніх і тропічних широтах та виконано порівняння цих величин з відповідними значеннями вологих складових ЗТЗ, отриманих з ГНСС-спостережень. До кожної з дев'яти аерологічних станцій підбирали найближчі активні референційні ГНСС-станції із відомими зенітними тропосферними затримками. Різницю висот між аерологічними та ГНСС-станціями нівелювали інтерполяванням. За аналітичною моделлю Saastamoinen обчислювали гідростатичні складові ЗТЗ. Потім ці значення гідростатичних складових віднімали від повних зенітних тропосферних затримок, виведених із ГНСС-вимірювань, в результаті чого отримали значення вологих складових ЗТЗ.

**Особенности вертикального
распределения влажной составляющей
зенитной тропосферной задержки
в средних и тропических широтах**
М. Пазяк, Ф. Заблоцкий

Проведено исследование вертикального распределения влажной составляющей зенитной тропосферной задержки (ЗТЗ) по данным аерологических

станций в средних и тропических широтах и выполнено сравнение этих величин с соответствующими значениями влажных составляющих ЗТЗ, полученных с ГНСС-наблюдений. К каждой из девяти аерологических станций подбирали ближайшие активные референционные ГНСС-станции с известными зенитными тропосферными задержками. Разницу высот между аерологическими и ГНСС-станциями нивелировали с помощью интерполяции. По аналитической модели Saastamoinen исчисляли гидростатические составляющие ЗТЗ. В дальнейшем эти величины гидростатических составляющих отнимали от полных зенитных тропосферных задержек, выведенных из ГНСС-измерений, в результате получив значения влажных составляющих ЗТЗ.

**Features of the vertical distribution
of the wet component of zenith
tropospheric delay in middle
and tropical latitudes**

M. Paziak, F. Zablotzkyi

The study of the vertical distribution of the wet component of the zenith tropospheric delay (ZTD) according to the data of the aerological stations in the middle and tropical latitudes has been carried out, and a comparison of these values with the corresponding values of the wet components of the ZTD obtained from the GNSS observations. The nearest active reference stations of the GNSS station with known zenith tropospheric delays were selected for each of the nine aerological stations. The difference in altitude between aerological and GNSS stations was leveled by interpolation. According to the analytical model Saastamoinen, the hydrostatic components of ZTD were calculated. Subsequently, these values of the hydrostatic components were subtracted from the complete zenith tropospheric delays derived from the GNSS measurements, which resulted in the values of the wet components of the ZTD.

