

ВИЗНАЧЕННЯ ОСАДЖУВАНОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА ДАНИМИ АЕРОЛОГІЧНИХ ТА ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ НА ЄВРОПЕЙСЬКИХ І ТРОПІЧНИХ СТАНЦІЯХ

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.01.020>

Мета роботи полягає в дослідженні атмосферної випадаючої водяної пари (PWV), що ґрунтується на опрацюванні аерологічних та ГНСС-вимірювань, а також порівнянні величин PWV, визначених за даними аерологічних і ГНСС-станцій, розміщених і в помірних, і тропічних широтах. **Методика.** Алгоритм визначення осаджуваної водяної пари на основі ГНСС-спостережень поділяється на кілька етапів: 1) за основним рівнянням кодових або фазових псевдовідстаней ГНСС-вимірювань визначають повну тропосферну затримку; 2) вибирають величини ZTD на момент ГНСС-спостережень [<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/troposphere/new/>]; 3) за аналітичною моделлю Saastamoinen обчислюють гідростатичну складову зенітної тропосферної затримки; 4) за величинами ЗТЗ і гідростатичною складовою отримують величини вологої складової ЗТЗ; 5) за вологою складовою ЗТЗ обчислюють величини інтегрованої IWV та осаджуваної водяної пари PWV. Величини IWV і PWV визначають також і за даними аерологічного зондування. **Результати.** В ході виконаних досліджень визначено складові ЗТЗ та величини PWV. Проведено порівняльну характеристику цих величин, визначених за даними і аерологічних, і ГНСС-станцій. Загалом точність визначення гідростатичної складової ЗТЗ становить близько 10 мм, а точність визначення вологої складової ЗТЗ, виведеної із ГНСС-вимірювань, приблизно 20 мм. Величини PWV, переважно, змінюються за аналогією до величин вологої складової ЗТЗ, а точність їх визначення досягає 3 мм. **Новизна та практична значущість.** Вперше виконано одночасні дослідження тропосферної затримки та її складових і вмісту водяної пари на п'яти станціях середніх широт та трьох станціях тропічної зони. Отримані результати надалі можна використати під час дослідження змін кліматичних процесів.

Ключові слова: ГНСС-вимірювання; волога складова зенітної тропосферної затримки; аерологічне зондування; водяна пара.

Вступ

В атмосферному повітрі постійно знаходиться водяна пара (вода у газоподібному стані). Понад 90 % її міститься в тропосфері. Водяна пара може переходити з газоподібного стану в рідкий або твердий стан, тому безперервно змінюється в просторі та часі. Саме з динамічним кругообігом води в атмосфері пов'язані найважливіші процеси погоди та особливості клімату. В зв'язку з цим, сьогодні розроблено чимало методів для врахування вмісту водяної пари в атмосферному повітрі і, відповідно, вологої складової ZWD. Однак всі ці методи не забезпечують достатньої точності визначення складової ZWD, і відповідно, точності ЗТЗ у разі сучасних геодезичних вимірювань. Розв'язок цієї проблеми закладено в роботі [Bevis та ін., 1992]. Розв'язуючи обернену задачу ГНСС-вимірювань, визначають величину ZWD, а від неї, перетворенням, отримують величини IWV ($\text{кг}/\text{м}^2$), а потім PWV (мм).

За кілька останніх десятиліть у цьому напрямі виконано чимало досліджень, деякі з них висвітлено в роботах [Fernandez, та ін., 2010; Chou, та ін., 2015; Yanxin, та ін., 2013; Chen, та ін., 2018; Suresh Raju, та ін., 2007; Naase, та ін., 2003; Castro-Almazán, та ін., 2016]. Аналіз ЗТЗ та PWV в середніх широтах наведено в працях [Каблак, 2011а, 2011б; Заблоцький, та ін., 2017; Савчук, Заблоцький, 2016; Каблак, Савчук, 2012]. Особливості зенітної тропосферної затримки та осаджуваної пари в тропічній зоні, визначеної за даними радіозондування і за аналітичними моделями та іншими методами, висвітлено в статтях [Заблоцький, Заблоцька, 2010; Vock, та ін., 2007; Manandhar та ін., 2018; Realini та ін., 2014]. Зокрема, автори виконали обширні дослідження ЗТЗ та її складових, отриманих у 2011 і 2013 роках на дев'яти станціях аерологічного зондування та дев'яти референціальних ГНСС-станціях, розміщених у помірних та тропічних широтах [Заблоцький, Савчук, 2014; Пазяк, Заблоцький, 2015 а, 2015 б; 2018]. У роботі основну увагу

зосереджено на дослідженні точності та порівнянні величин ЗТЗ та PWV, отриманих за даними аерологічних та ГНСС-станцій.

Мета

Основна мета роботи – дослідити атмосферну випадаючу водяну пару PWV, що ґрунтується на опрацюванні аерологічних та ГНСС-вимірювань, а також у порівнянні величин PWV, визначених за даними аерологічних і ГНСС-станцій, розміщених як в помірних, так і тропічних широтах.

Методика досліджень

До кожної аерологічної станції підібрано найближчу відповідну активну референцну ГНСС-станцію, що продукує відомі зенітні тропосферні затримки. Для коректного порівнювання результатів вимірювань, проводилось редукування основних метеорологічних величин (атмосферного тиску P, температури повітря t, відносної вологості U) на станціях аерологічного зондування до висот відповідних ГНСС-станцій. Оскільки максимальні висоти, досягнуті кулями – зондами під час радіозондування на обраних станціях, здебільшого, становили приблизно 35 км, то від цієї висоти до 80 км тиск та температуру вибрано зі стандартної моделі атмосфери СМА-81.

Алгоритм визначення осаджуваної водяної пари на основі ГНСС-спостережень складається із кількох етапів: 1) за основним рівнянням кодових або фазових псевдовідстаней ГНСС-вимірювань визначають загальну тропосферну затримку; 2) вибирають величини ЗТЗ на момент ГНСС-спостережень [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/troposphere/new/]; 3) за

аналітичною моделлю Saastamoinen обчислюють гідростатичну складову зенітної тропосферної затримки; 4) за величинами ЗТЗ і гідростатичною складовою отримують величини вологої складової ЗТЗ; 5) за вологою складовою ЗТЗ обчислюють величини інтегрованої IWV та осаджуваної водяної пари PWV. Всі необхідні для обчислення формули в доступній формі описані в роботі [Заблоцький, та ін., 2017]. Потрібно зазначити, що величини PWV також визначають і за вертикальними профілями основних метеорологічних величин, тобто в процесі аерологічного зондування атмосфери; їх величини подані на сайті [http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html].

Однак для коректного порівняння даних, до уваги брали величини PWV, які обчислювали за вологою складовою ЗТЗ, визначеною з аерологічного зондування з урахуванням редукації метеорологічних величин.

Характеристика вихідних даних

За початкові дані у дослідженні приймали вертикальні профілі основних метеорологічних величин, отримані із радіозондувань за десятиденний період січня та липня 2018 року на п'яти аерологічних станціях [http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html]. В загальному, станції вибирались у центрально-східному регіоні Європи, що розміщені близько 50-ї паралелі. Аналогічні дані вибрано і для трьох станцій, розташованих в екваторіальній зоні. Величини загальної ЗТЗ за даними відповідних ГНСС-станцій для зазначених днів вибирали з [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/troposphere/new/]. Координати станцій приведено 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

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
52 23	20 57	96,0	52 28	21 02	139,9		
Poprad, 11952			GANP			Словаччина	1,2
49 02	20 18	706,0	49 02	20 19	745,2		
Beauvecchain, 06458			BRUX			Бельгія	29,4
50 45	4 46	127,0	50 47	4 21	158,3		
<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		

Опрацювання даних і аналіз отриманих результатів

У результаті проведених досліджень та після опрацювання зазначених даних, отримано: величини гідростатичної та вологості складових ЗТЗ, визначених за даними радіозондування $d_{h(aer)}^z$ і $d_{w(aer)}^z$; $\Delta d_{h(SA)}^z$ – різниці гідростатичної складової, обчислені за даними радіозондування $d_{h(aer)}^z$ та моделлю Saastamoinen $d_{h(SA)}^z$; різниці $\Delta d_{w(GPS)}^z$ – виведені із радіозондування

$d_{w(aer)}^z$ та ГНСС-спостережень $d_{w(GPS)}^z$; різниці осаджуваної водяної пари ΔPWV , що обчислені за даними радіозондування $PWV_{(aer)}$ та ГНСС-вимірювань $PWV_{(GPS)}$; величини загальної ЗТЗ, виведеної із ГНСС-спостережень $d_{trop(GPS)}^z$. В зв'язку з великим масивом даних немає змоги подати всі наявні обчислення, однак для відображення загальної картини в табл. 2 наведемо усереднені значення вищевказаних величин.

Таблиця 2

Усереднені величини

Назва станції	$d_{h(aer)}^z$	$d_{w(aer)}^z$	$\Delta d_{h(SA)}^z$	$d_{trop(GPS)}^z$	$\Delta d_{w(GPS)}^z$	$PWV_{(aer)}$	ΔPWV
1	2	3	4	5	6	7	8
Січень							
Praha-Libus – GOPE	2151,2	52,4	0,7	2207,7	-4,9	8,1	-0,75
Kyiv – GLSV	2269,4	39,3	8,7	2297,3	2,6	6,0	0,40
Legionovo – BOGI	2301,1	46,4	4,1	2343,2	0,1	7,1	0,02
Beauvecchain – BRUX	2266,0	71,7	4,9	2337,3	-4,5	11,1	-0,70
Poprad-Ganovce – GANP	2106,5	41,4	-1,9	2155,2	-5,4	6,3	-0,82
Guam – GUAM	2249,9	179,2	-7,7	2447,4	-10,7	29,5	-1,76
Singapore – NTUS	2278,1	337,6	-7,1	2614,9	7,9	55,1	1,30
Pago Pago – ASPA	2284,0	290,9	-8,2	2613,4	-30,3	48,0	-5,01
Липень							
Praha-Libus – GOPE	2153,0	132,6	-4,2	2302,2	-12,5	21,3	-2,01
Kyiv – GLSV	2224,9	187,5	-7,2	2436,4	-16,7	30,3	-2,70
Legionovo – BOGI	2259,7	215,9	-1,9	2477,5	-0,1	34,8	-0,01
Beauvecchain – BRUX	2264,8	154,9	-9,4	2452,2	-23,2	25,2	-3,77

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
Poprad-Ganovce – GANP	2109,0	158,3	-5,2	2277,9	-5,4	25,3	-0,87
Guam – GUAM	2243,0	339,4	-9,1	2612,5	-21,0	55,8	-3,46
Singapore – NTUS	2275,5	329,2	-8,1	2606,0	6,7	54,2	1,11
Pago Pago – ASPA	2288,9	229,4	-8,7	2548,8	-21,9	37,8	-3,61

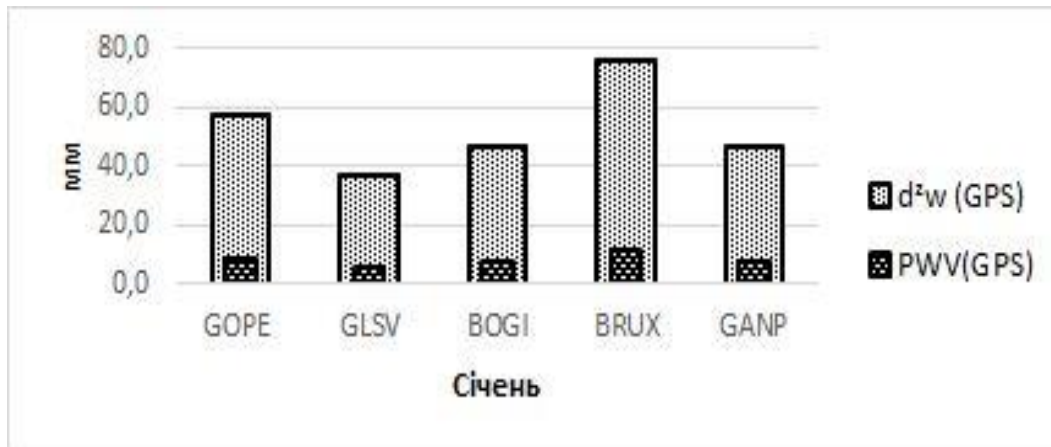


Рис. 1. Усреднені величини $d^z_{w(GPS)}$ та $PWV_{(GPS)}$ за даними станцій середніх широт за січень

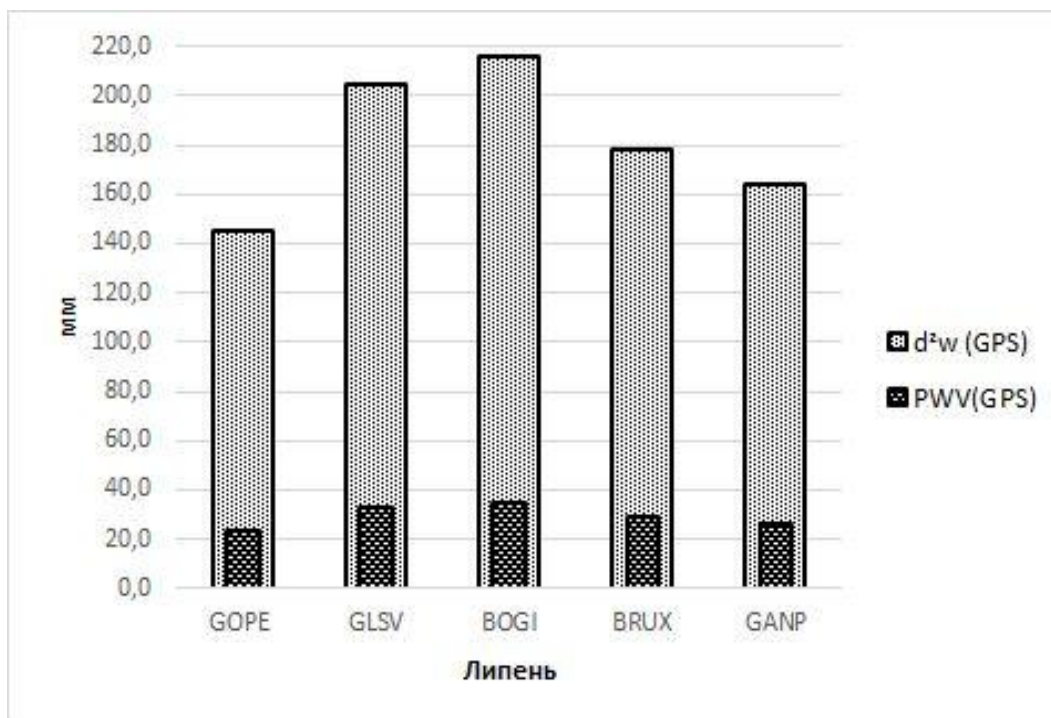


Рис. 2. Усреднені величини $d^z_{w(GPS)}$ та $PWV_{(GPS)}$ за даними станцій середніх широт за липень

Як видно, з рис. 1 та 2 на станціях середніх широт величини $d^z_{w(GPS)}$ і $PWV_{(GPS)}$ у липні значно більші, ніж у січні. Це насамперед зумовлено різним температурним режимом у ці пори року,

а також більшим вмістом водяної пари в атмосфері в літній період. Оскільки зазначені величини приведені в мм, то масштабні співвідношення ($\frac{d_w^{z(GPS)}}{PWV(GPS)}$) для них, за даними

станцій в середніх широтах, коливаються від 6,44 до 6,60 в січні. У липні ці співвідношення є дещо меншими і знаходяться в межах 6,14–6,25.

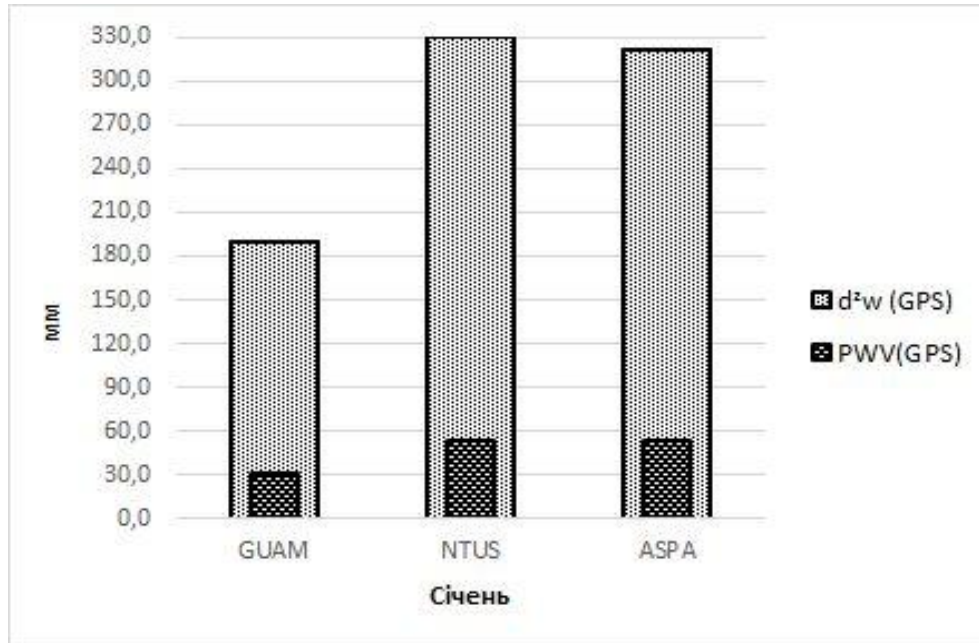


Рис. 3. Усреднені величини $d_w^{z(GPS)}$ та $PWV(GPS)$ за даними станцій тропічних широт за січень

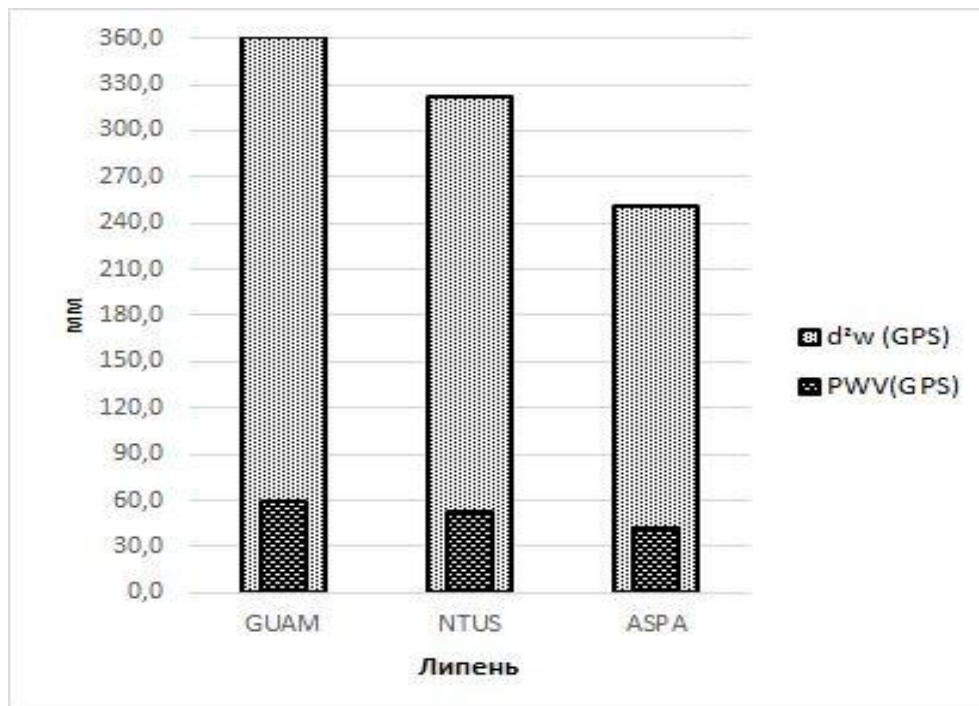


Рис. 4. Усреднені величини $d_w^{z(GPS)}$ та $PWV(GPS)$ за даними станцій тропічних широт за липень

З рис. 3 та 4 бачимо, що величини $d_{w(GPS)}^z$ та $PWV_{(GPS)}$ є значно більшими у тропічних широтах, ніж у середніх (окрім станції GUAM), а масштабні співвідношення, як влітку, так і взимку є практично однаковими і в середньому становлять 6,08. Варто зазначити, що на аерологічній станції Guam у січні за результатами зондувань спостерігається аномальний розподіл відносної вологості з висотою, насамперед у нижньому 5-и км шарі, що різко зменшує вміст водяної пари в атмосфері, і, відповідно, вологості складової ЗТЗ. На відміну від січня, в липні спостерігається рівномірне

падіння відносної вологості з висотою. В результаті, практично за однакових приземних температур повітря, (і в січні, і в липні $t > 25 \text{ }^\circ\text{C}$), величина вологості складової є різною. Як видно з рисунків, у січні волога складова $d_{w(GPS)}^z$ є удвічі меншою, ніж у липні.

Аналізуючи вищенаведені рисунки, можна сказати, що величини PWV змінюються за аналогією до величин $d_{w(GPS)}^z$. У табл. 3 приведено статистичні характеристики різниць гідростатичної та вологості складових ЗТЗ, а також різниці осаджуваної водяної пари ΔPWV .

Таблиця 3

Статистичні характеристики різниць

Станції Хар-ки	Середні широти					Тропічні широти		
	Praha GOPE	Kyiv GLSV	Legionowo BOGI	Beauvecchain BRUX	Poprad GANP	Guam GUAM	Singapore NTUS	Pago Pago ASPA
Січень, 2018								
min $\Delta d_{h(SA)}^z$	-1,2	6,0	2,1	-2,2	-4,7	-8,4	-8,7	-8,7
max $\Delta d_{h(SA)}^z$	7,9	11,7	7,6	16,5	1,4	-6,9	-5,6	-5,9
m	2,7	8,9	4,3	7,3	2,5	7,7	7,2	8,2
σ	2,8	1,7	1,5	5,6	1,6	0,4	1,0	0,9
min $\Delta d_{w(GPS)}^z$	-13,6	-15,7	-8,2	-21,2	-8,3	-28,8	-2,3	-48,8
max $\Delta d_{w(GPS)}^z$	5,7	13,1	3,1	28,5	-2,7	11,5	12,5	1,5
m	7,6	8,0	3,6	13,9	5,7	15,4	9,4	35,3
σ	6,1	7,9	3,8	13,8	1,8	11,7	5,2	19,1
min ΔPWV	-2,10	-2,40	-1,27	-3,30	-1,28	-4,73	-0,38	-8,77
max ΔPWV	0,88	1,49	0,64	4,41	-0,41	1,90	2,05	0,24
m	1,16	1,21	0,55	2,16	0,87	2,54	1,53	5,84
σ	0,94	1,20	0,58	2,15	0,28	1,93	0,85	3,16
Липень, 2018								
min $\Delta d_{h(SA)}^z$	-6,1	-12,9	-4,0	-15,0	-6,5	-9,9	-10,0	-9,6
max $\Delta d_{h(SA)}^z$	-3,2	-3,8	0,7	-5,6	-3,3	-7,9	-6,9	-7,4
m	4,3	7,8	2,4	9,9	5,3	9,1	8,2	8,7
σ	1,0	3,2	1,6	3,4	1,0	0,6	1,0	0,8
min $\Delta d_{w(GPS)}^z$	-34,7	-29,8	-8,7	-47,6	-19,2	-56,4	-10,8	-41,3
max $\Delta d_{w(GPS)}^z$	12,4	10,7	10,4	2,7	10,7	-1,6	14,1	-12,8
m	17,3	19,9	5,2	27,9	10,7	26,1	10,8	23,8
σ	12,7	11,3	5,5	16,3	9,7	16,2	8,9	9,8
min ΔPWV	-5,59	-4,81	-1,40	-7,71	-3,07	-9,29	-1,79	-6,82
max ΔPWV	1,98	1,73	1,68	0,44	1,72	-0,26	2,50	-2,11
m	2,79	3,21	0,84	4,54	1,71	4,29	1,78	3,92
σ	2,05	1,82	0,88	2,66	1,55	2,68	1,46	1,61

У табл. 3 подано такі позначення: \min і \max – відповідно мінімальні та максимальні значення приведених різниць, m – середня квадратична помилка, σ – стандартне відхилення. Проаналізувавши таблицю, зазначимо, що екстремальні відхилення для різниць $\Delta d_{h(SA)}^z$ і взимку, і влітку не перевищують 10 мм, що підтверджує точне визначення гідростатичної складової за моделлю Saastamoinen. Винятком є пара станцій Beauveschain – BRUX, де у січні екстремальне відхилення становить 18,7 мм, а стандартне відхилення $\sigma = 5,6$ мм, що в 2–3 рази перевищує відповідні характеристики інших станцій. Це можна пояснити тим, що на станції Beauveschain у січні висоти зондувань, в середньому, не перевищували 17 км, що є практично вдвічі менше за загальноприйняті висоти зондувань – 35 км, а це, безпосередньо, знижує точність визначення гідростатичної складової.

Щодо особливостей розкиду різниць вологих складових $\Delta d_{w(GPS)}^z$, то для помірних широт у зимовий період він майже вдвічі менший, ніж у літній, окрім, станцій Beauveschain – BRUX, де такий розкид сягає 50 мм. Це певною мірою пов'язано з географічним розташуванням станцій, відносна вологість повітря тут і взимку, і влітку досить висока через близькість Атлантичного океану.

Що ж до розкиду різниць ΔPWV , то за даними і європейських, і тропічних станцій, за зимовий та літній сезони ці величини не перевищують 10 мм.

Новизна та практична значущість

Вперше виконано одночасні дослідження тропосферної затримки, її складових та вмісту водяної пари на п'яти станціях середніх широт та трьох станціях тропічної зони. Отримані результати надалі можна використовувати під час дослідження змін кліматичних процесів.

Висновки

В процесі виконуваних досліджень проведено порівняльну характеристику величин гідростатичної й вологої складових ЗТЗ та осаджуваної водяної пари PWV, визначених за даними аерологічних і ГНСС-станцій, розміщених і у помірних, і тропічних широтах.

Загалом точність визначення гідростатичної складової ЗТЗ становить близько 10 мм, а точність визначення вологої складової ЗТЗ, виведеної із ГНСС-вимірювань приблизно 20 мм. Величини PWV переважно змінюються за аналогією до величин $d_{w(GPS)}^z$, а точність їх визначення досягає ≈ 3 мм.

Як уже зазначено, на станції Guam у січні за результатами зондувань спостерігався аномальний розподіл відносної вологості повітря з висотою, тому для уточнення причини такої аномальності надалі доцільно збільшити низку експериментальних даних, опрацьовуючи та аналізуючи щомісячні зондування для станції Guam протягом року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Заблоцький Ф. Д., Заблоцька О. Ф. Аналіз зенітної тропосферної затримки в тихоокеанських широтах. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Л.: Ліга-Прес, 2010. Вип. 1. С. 50–55.
- Заблоцький Ф. Д., Пазяк М. В. Аналіз зенітної тропосферної затримки, визначеної в ході ГНСС-вимірювань та радіозондувань у тропічних і середніх широтах. *Вісник геодезії та картографії*. К.: НДІГК. 2015а. № 3. С. 7–9.
- Заблоцький Ф., Гресько Ю., Паляниця Б. Моніторинг водяної пари за даними радіозондування та GNSS-вимірювань на станціях Київ і GLSV. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2017. Вип. 85. С. 13–17.
- Каблак Н. І., Савчук С. Г. Дистанційний моніторинг атмосфери. *Космічна наука і технологія*. 2012. Т. 18. № 2. С. 20–25.
- Каблак Н. І. Дистанційне зондування водяної пари в атмосфері за допомогою навігаційних супутникових систем. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011а. Вип. 75. С. 31–35.
- Каблак Н. І. Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНСС-даних. *Космічна наука і технологія*. 2011б. Т. 17. № 4. С. 65–73.
- Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д. Особливості вертикального розподілу вологої складової зенітної тропосферної затримки в середніх і тропічних широтах. *Науковий журнал «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, 2018. № 2 (36), С. 41–49.
- Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д. Порівняння вологої складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GNSS-вимірювань, з відповідною величиною із радіозондування. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015б. Вип. 81. С. 16–24.

- Савчук М. В., Заблоцький Ф. Д. Оцінювання гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки, за даними радіозондування. *Вісник геодезії та картографії*. Київ: НДІГК, 2014. № 6. С. 3–5.
- Савчук С. Г., Заблоцький Ф. Д. Моніторинг тропосферної водяної пари у західній транс-кордонній зоні України. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2016. Вип. 83. С. 21–33.
- Служба атмосферних досліджень при університеті Вайомінгу, Інтернет ресурс [Режим доступу]: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- Тропосферні файли GNSS спостережень, Інтернет ресурс [Режим доступу]: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/troposphere/new/>
- Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A. and Ware R.H., (1992). «GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Position System» // *Journal of Geophysical Research*. (1992), Vol. 97, No. D14, P. 15, 787–15, 801.
- Bock O., Bouin M.-N., Walpersdorf A., Lafore J. P., Janicot S., Guichard F., & Agustí-Panareda A. (2007). Comparison of ground-based GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa. *Quarterly journal of the royal meteorological society* 133: pp. 2011–2027.
- Chen B., Dai W., Liu Z., Wu L., Kuang C., & Ao M. (2018). Constructing Precipitable Water Vapor Map from Regional GNSS Network Observations without Collocated Meteorological Data. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* pp. 1-20, <https://doi.org/10.5194/amt-83>
- Fernández L. I., Salio P., Natali M. P., & Meza A. M. (2010). Estimation of precipitable water vapour from GPS measurements in Argentina: Validation and qualitative analysis of results. *Advances in Space Research* Volume 46, Issue 7, pp. 879–894.
- Julio A. Castro-Almazán, Gabriel Pérez-Jordán, & Casiana Muñoz-Tuñón, (2016). A semiempirical error estimation technique for PWV derived from atmospheric radiosonde data. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 4759–4781.
- Haase J., Ge M., Vedel H., & Calais E. (2003). Accuracy and Variability of GPS Tropospheric Delay Measurements of Water Vapor in the Western Mediterranean. *American Meteorological Society*, Volume 42, pp. 1547–1568.
- Realini E., Sato K., Tsuda T., & Manik S. (2014). An observation campaign of precipitable water vapor with multiple GPS receivers in western Java, Indonesia. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1:17, pp. 1–20.
- Shilpa Manandhar, Yee HuiLee, Yu Song Meng, Feng Yuan, & Jin Teong Ong. (2018). GPS-Derived PWV for Rainfall Nowcasting in Tropical Region. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, pp. 1–10.
- Suelynn Choy, Chuan-Sheng Wang, Ta-Kang Yeh, John Dawson, Minghai Jia, & Yuriy Kuleshov (2015). Precipitable Water Vapor Estimates in the Australian Region from Ground-Based GPS Observations. *Advances in Meteorology*, Volume, Article ID 95481, pp. 1–14.
- Suresh C. Raju, K. Saha, B. V. Thampi, & K. Parameswaran. (2007). Empirical model for mean temperature for Indian zone and estimation of precipitable water vapor from ground based GPS measurements. *Annales Geophysicae*, 25, pp. 1935–1948.
- Yanxin T., Lilong L., & Chaolong Y. (2013). Empirical model for mean temperature and assessment of precipitable water vapor derived from GPS. *Geodesy and Geodynamics*, 4 (4): pp. 51–56.

M. PAZIAK

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. 066-27-38-901, e-mail mvolsavchuk@ukr.net

DETERMINATION OF PRECIPITABLE WATER VAPOUR, FROM THE DATA OF AEROLOGICAL AND GNSS MEASUREMENTS AT EUROPEAN AND TROPICAL STATIONS

The purpose of the given work lies in the studies of the atmospheric precipitable water vapour (PWV), based on the processing of aerological and GNSS (Global Navigation Satellite System) measurements, as well as the comparing of PWV values, determined according to the data of aerological and GNSS stations, located both in temperate and tropical latitudes. **Methodology.** The algorithm for determination of precipitable water vapour, based on GNSS observations, is divided into several stages: 1) the total tropospheric delay is determined by the basic equation of code or phase pseudodistances of GNSS measurements; 2) select zenith tropospheric delay (ZTD) values at the time of GNSS observations [<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/troposphere/new/>]; 3) according to the analytical Saastamoinen model, the hydrostatic component of the zenith tropospheric delay (ZTD) is calculated; 4) according to the ZTD values and hydrostatic component, the wet component values of the ZTD are obtained; 5) the conversion from the wet component to the integrated water vapour (IWV) component and the precipitable water vapour PWV is realized. The IWV and PWV values are also defined by upper-air sounding data. **Results.** In the

course of the performed research, the ZTD components and the PWV values were determined. A comparative characteristics of the present values was carried out, which were defined according to the data of both aerological and GNSS stations. Generally, the accuracy of the hydrostatic component of the ZTD determination is about 10 mm, and the accuracy of the wet component definition of ZTD, deducted from GNSS measurements, is approximately 20 mm. The PWV values mainly vary by analogy to the values of wet component of ZTD, and the accuracy of its definition reaches 3 mm. **Novelty and practical significance.** For the first time, simultaneous studies of the ZTD and its components and the water vapor content at five stations in the middle latitudes and three stations of the tropical zone were conducted. The obtained results can further be used in the studies of changes in climatic processes.

Key words: GNSS measurements; wet component of the zenith tropospheric delay; upper-air sounding; water vapour.

Надійшла 10.12.2018 р.