

Ф. Д.ЗАБЛОЦЬКИЙ¹, Ю. Б.ГРЕСЬКО, Б. Б.ПАЛЯНИЦЯКафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, тел. 067-71-62-152, ¹ел. пошта fzablots@polynet.lviv.ua.

МОНІТОРИНГ ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА ДАНИМИ РАДІОЗОНДУВАННЯ ТА GNSS-ВИМІРЮВАНЬ НА СТАНЦІЯХ КИЇВ І GLSV

Метою даної роботи є визначення вмісту водяної пари, обчисленої за вологою складовою зенітної тропосферної затримки (ЗТЗ), отриманою за даними радіозондувань і GNSS-вимірювань. **Методика** досліджень полягає в наступному: вологу складову ЗТЗ визначають як різницю між повною ЗТЗ, виведеною із GNSS-вимірювань і обчисленою гідростатичною складовою. Далі за отриманою вологою складовою обчислюють інтегровану та осаджувану водяну пару. Для опрацювання використані шестиденні дані радіозондування за кожен місяць 2016 року на аерологічній станції Київ і дані зенітної тропосферної затримки, виведені із GNSS-спостережень для тих же самих дат, на перманентній станції GLSV. **Результати** досліджень представляють собою величини вологої складової ЗТЗ і осаджуваної водяної пари, отримані за даними радіозондування і виведені із GNSS-спостережень. За різницями між величинами вологої складової, обчисленими із радіозондування та визначеними із GNSS-вимірювань, зроблено оцінку точності. Аналогічно проведено оцінювання і для величин осаджуваної водяної пари. **Наукова новизна та практична значущість** полягають в тому, що отримані результати слугуватимуть підґрунтям для подальшого підвищення точності визначення вологої складової із GNSS-вимірювань, зокрема, для визначення просторово-часових змін та вмісту осаджуваної водяної пари в атмосфері, що важливим є для прогнозування погоди в даному регіоні.

Ключові слова: GNSS-вимірювання; радіозондування; зенітна тропосферна затримка; гідростатична складова; волога складова; інтегрована та осаджувана водяна пара.

Вступ

Питання визначення вологої складової ЗТЗ, а також інтегрованої та осаджуваної водяної пари із GNSS-вимірювань, висвітлені в багатьох роботах, зокрема: [Заблоцький Ф. Д., 2013; Каблак Н. І., 2011а, 2011б; Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д., 2015; Паляниця Б. Б., Олійник В. Р., Бойко В. М., 2016; Bevis V. S. et al., 1992; Bocolari M. et al, 2002; Mendes V. B., 1999; Ning T., 2012; Rocken C., 2005; Schueler T., 2001]. та ін. Проте, досі ще остаточно не встановлено з якою ж точністю визначається волога складова ЗТЗ, отримана за даними GNSS-спостережень, а відповідно і вміст водяної пари в атмосфері.

Мета

Метою даної роботи є моніторинг водяної пари, обчисленої за вологою складовою ЗТЗ, отриманою за даними радіозондування та GNSS-вимірювань на аерологічній станції Київ та GLSV GNSS станції [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>; <http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>].

Методика досліджень

Найточніше складові ЗТЗ визначаються за даними радіозондування атмосфери. Так, гідростатичну складову визначають інтегруванням індексу показника заломлення N [Заблоцький, Ф. Д., 2013]:

$$d_h^z = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_d} N_h \cdot dH = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_d} K_1 \frac{P}{T} \left(1 - 0,378 \frac{e}{P} \right) \cdot dH \quad (1)$$

де H_d і H_0 – верхня і нижня межа прийнятої сухої атмосфери; dH – прошарок інтегрування; K_1 – емпіричний коефіцієнт індексу показника заломлення; P –

атмосферний тиск; T – температура повітря за шкалою Кельвіна; e – парціальний тиск водяної пари.

Вологу складову ЗТЗ визначають за формулою:

$$d_w^z = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_w} N_w \cdot dH = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_w} \left((K_2 - K_1 \cdot 0,622 \cdot \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}) \cdot Z_w^{-1} \cdot dH \right), \quad (2)$$

де H_w і H_0 – верхня і нижня межа прийнятої вологої атмосфери; N_w – волога складова індексу показника заломлення для радіохвиль; K_2 і K_3 – емпіричні коефіцієнти індексу показника заломлення; Z_w^{-1} – коефіцієнт стисливості водяної пари.

Більш ніж 20 років тому активно почав використовуватись підхід до визначення вмісту водяної пари в атмосфері на підставі тропосферної затримки, виведеної із вимірювань GNSS [Bevis, M. S. et.al., 1992]. Визначення вологої складової ЗТЗ із GNSS-спостережень зводиться до наступного. На підставі основного рівняння кодових або фазових псевдовідстаней GNSS-спостережень виділяють повну тропосферну затримку:

$$d_{trop} = P_r^s - \rho_r^s \quad (3)$$

де P_r^s і ρ_r^s – кодова псевдовідстань і геометрична відстань між GNSS- супутником і приймачем.

Від тропосферної затримки d_{trop} переходять до її Zenітної проєкції d_{trop}^z , використовуючи функції відображення, наприклад [Niell A. E., 1996].

Оскільки величина Zenітної тропосферної затримки рівна сумі гідростатичної і вологої складових:

$$d_{trop}^z = d_h^z + d_w^z, \quad (4)$$

то на наступному етапі визначають гідростатичну складову ЗТЗ, переважно за формулою Saastamoinen:

$$d_{hSA}^z = \frac{0.002277 \cdot P_0}{1 - 0.0026 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot H_0}, \quad (5)$$

де φ – широта пункту спостережень; P_0 і H_0 – приземне значення атмосферного тиску та висота пункту над рівнем моря.

Інтегровану водяну пару IWV (кг/м²) обчислюють за формулою:

$$IWV = \frac{d_w^z}{10^{-6} \cdot R_w \left[(K_2 - K_1 \cdot 0,622) + \frac{K_3}{(70,2 + 0,72 \cdot T_0)} \right]} \quad (6)$$

де d_w^z – волога складова ЗТЗ, $R_w = 461,525$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹ – питома газова стала водяної пари, K_1 , K_2 , K_3 – емпіричні коефіцієнти індексу показника заломлення.

Для того, щоб перейти від інтегрованої водяної пари до осаджуваної водяної пари PWV використовують наступну формулу:

$$PWV = \frac{IWV}{\rho_{H_2O}}, \quad (7)$$

де $\rho_{H_2O} = 10^3$ кг/м³ – густина рідкої води.

Характеристика вихідних даних

Для опрацювання та аналізу використані: дані радіозондування на аерологічній станції Київ, зокрема, шестиденні за кожен місяць 2016 року вертикальні профілі атмосферного тиску, температури і відносної вологості повітря від поверхні станції до 25-30 км [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>]. Вказані терміни зондування припадають на середню декаду кожного місяця, на 0^h UT (Всесвітнього часу); дані Zenітної тропосферної затримки, виведені із GNSS-спостережень на перманентній станції GLSV (Голосіїво), вибрані для тих же самих днів, на 0^h UT, що й дані радіозондування [<http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>].

Опрацювання даних і аналіз отриманих результатів

В результаті опрацювання зазначених даних отримані складові ЗТЗ за даними радіозондування; величини вологої складової, виведені із GNSS-спостережень, а також величини осаджуваної водяної пари (табл. 1).

Табл.1 наведена як фрагмент (червень) для наглядності виконаних досліджень. Величини в колонках 2 і 3 обчислені за формулами (1 і 2). Гідростатична складова (колонка 4) визначена за формулою (5). Повна ЗТЗ, виведена із GNSS-спостережень. (колонка 5), а волога складова

$d_{w(GPS)}^z$ є різницею між величинами в колонках 5 і 4 відповідно. Значення $PWV_{\text{сайт}}$ вибирались для кожного зондування [http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html], а PWV_{GPS} обчислені за формулою (8). Величина

Δ є різницею між величинами PWV в колонках 7 і 8 відповідно.

На рис. 1 наведені усереднені величини вологої складової $d_{w(GPS)}^z$ і осаджуваної водяної пари PWV_{GPS} для різних сезонів року.

Таблиця 1

Складові ЗТЗ (мм) та осаджувана водяна пара (мм) за даними радіозондування та GNSS-спостережень

Дата	$d_{h(\text{аер})}^z$	$d_{w(\text{аер})}^z$	$d_{h(SA)}^z$	$d_{trop(GPS)}^z$	$d_{w(GPS)}^z$	$PWV_{\text{сайт}}$	PWV_{GPS}	Δ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
12.Чер	2239,1	74,4	2241,8	2311,1	69,3	12,3	11,0	1,3
13.Чер	2238,0	98,8	2241,8	2328,5	86,7	16,3	13,8	2,6
15.Чер	2216,8	186,0	2219,5	2432,2	212,7	30,7	34,2	-3,5
16.Чер	2220,9	205,7	2224,0	2447,4	223,4	34,1	35,9	-1,8
17.Чер	2243,8	149,3	2249,0	2375,1	126,1	25,2	20,4	4,8
18.Чер	2239,9	219,9	2244,5	2454,1	209,6	37,3	34,0	3,2
середнє	2233,1	155,7	2236,8	2391,4	154,6	26,0	24,9	1,1

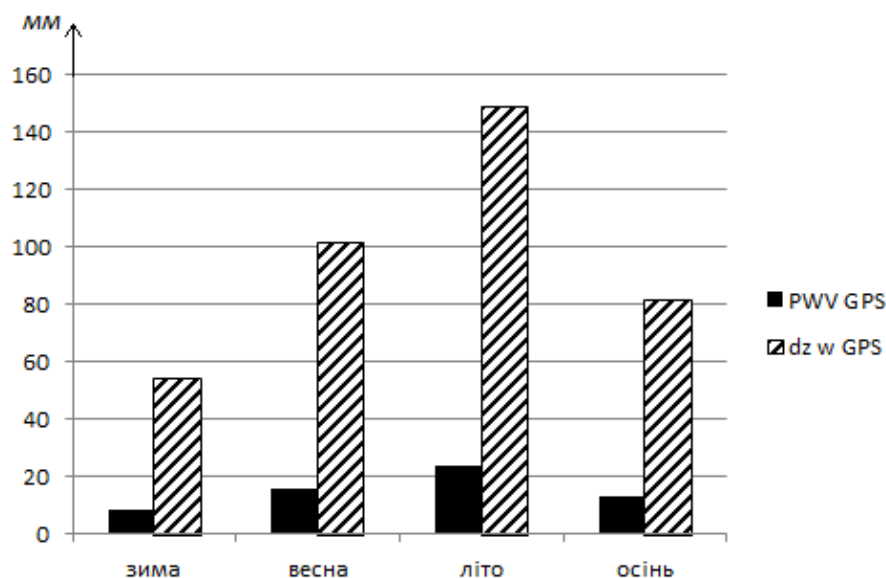


Рис. 1. Сезонні усереднені величини $d_{w(GPS)}^z$ і PWV_{GPS}

Як видно з рис. 1 максимальні величини вологої складової і осаджуваної водяної пари припадають на літній сезон, а мінімальні – на зимовий, що пояснюється, відповідно, максимальними і мінімальними температурами повітря у ці сезони. Зазначимо, що, оскільки, і перші і другі величини мають метричну міру (в даній роботі вони виражені в міліметрах), то масштабне співвідношення величин $d_{w(GPS)}^z$ до PWV_{GPS} в досліджуваному регіоні складає як

6,36:1. При цьому, зауважимо, що максимальні співвідношення 6,52:1 припадають теж на зимовий період, а мінімальні 6,19:1 – на літній.

На рис. 2 показані усереднені сезонні різниці вологої складової ЗТЗ між усередненими значеннями вологої складової, визначеними за даними радіозондування та відповідними значеннями, виведеними із GNSS-вимірювань, а також максимальні (додатні) і мінімальні (від'ємні) відхилення цих різниць на протязі сезону.

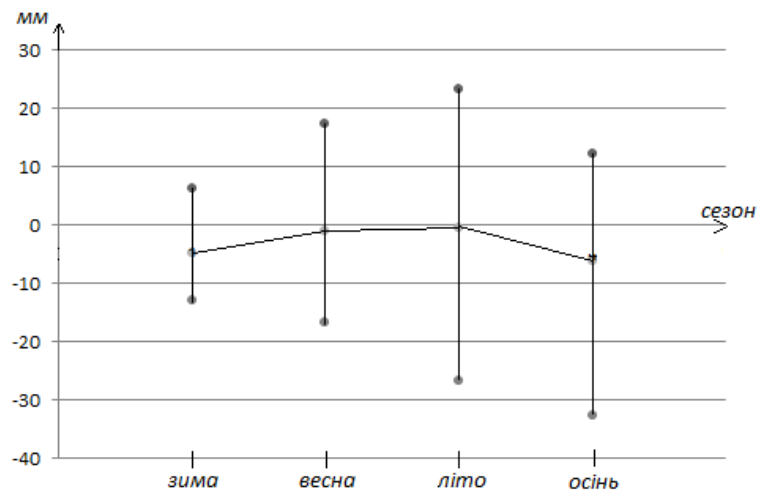


Рис. 2. Усереднені сезонні величини різниць Δd_w^z (по горизонтальній осі) та їх екстремальні відхилення (вздовж вертикальної осі)

Як видно з рис. 2, найбільший розмах величин Δd_w^z спостерігається в літній період і складає 50 мм, в осінній період він є дещо меншим і становить 45 мм. Зимовою такий розмах

є найменшим і рівний 19 мм, а весною він становить 34 мм.

Оцінка точності отриманих величин Δd_w^z приведена в табл. 2

Таблиця 2.

Середні значення Δd_w^z , їх середні квадратичні помилки m та стандартні відхилення σ

Сезон Оцінка	Зима	Весна	Літо	Осінь
середнє	-4,9	-1,2	-0,7	-6,2
m	6,9	8,7	13,8	12,0
σ	5,0	8,9	14,2	10,5

За результатами табл. 2 слід зазначити таке:

- середні значення Δd_w^z є малими від'ємними величинами, особливо літом і весною, що може вказувати на деяку систематичну помилку. Уточнення цього питання вимагає значно більшого ряду даних таких досліджень;
- середні квадратичні помилки та стандартні відхилення перевищують в літньо-осінній період 10 мм.

На рис. 3 показані по аналогії з рис. 2 усереднені сезонні різниці Δ величин осаджуваної водяної пари PWV між вибраними її значеннями із сайту [http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html] та обчисленими за вологими складовими ЗТЗ, виведеними із GNSS-спостережень.

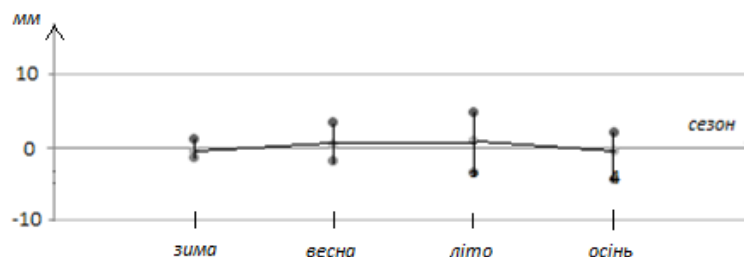


Рис. 3. Усереднені сезонні величини різниць ΔPWV (по горизонтальній осі) та їх екстремальні відхилення (вздовж вертикальної осі)

Зазначимо, що середні значення ΔPWV та їх середні квадратичні помилки складають за сезонами, відповідно: -0,5 і 0,9; 0,3 і 1,4; 0,8 і 2,4 та 0,6 і 1,6.

Наукова новизна та практична значущість

Отримані результати слугуватимуть підґрунтям для подальшого підвищення точності визначення вологості складової із GNSS-вимірювань, зокрема, для визначення просторово-часових змін та вмісту осаджуваної водяної пари в атмосфері, що важливим є для прогнозування погоди в даному регіоні.

Висновки

Точність визначення вологості складової ЗТЗ, виведеної із GNSS-вимірювань становить близько 15 мм в літній період. Зазначимо, що приблизно такі ж оцінки отримані за даними вимірювань на станціях Центральної Європи [Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д., 2015]. Що стосується точності визначення осаджуваної водяної пари, то її зміна відбувається аналогічно зміні вологості складової ЗТЗ. В літній період точність визначення величини PWV_{GPS} досягає 2,5 мм.

Зазначимо, що висвітлені результати отримані лише на шестиденних щомісячних інтервалах 2016 року. Отже, в подальшому, подібними дослідженнями доцільно охопити більш довгі ряди спостережень як щомісячно, так і за декілька років.

Література

- Заблоцький, Ф. Д. ГНСС - метеорологія: навчальний посібник / Ф. Д. Заблоцький – Л.: Нац. ун. — «Львівська політехніка», 2013. – 95 с.
- Каблак Н. І. Дистанційне зондування водяної пари в атмосфері за допомогою навігаційних супутникових систем / Каблак Н. І. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2011. – Вип. 75. – С. 31-35.
- Каблак Н. І. Моніторинг осаджуваної водяної пари на основі обробки ГНСС-даних / Каблак Н. І. // Космічна наука і технологія. - 2011. – т. 17. - № 4. – с. 65-73.
- Пазяк М. В. Порівняння вологості складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GNSS -

вимірювань, з відповідною величиною із радіозондування / Пазяк М. В., Заблоцький Ф. Д. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2015. – Вип. 81. – С. 15-23.

Паляниця Б. Б. Дослідження річних змін зенітної тропосферної затримки за даними українських метеостанцій / Паляниця Б. Б., Олійник В. Р., Бойко В. М. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2016. – Вип. 83. – С. 13-20.

Радиозондирование атмосферы. – Реж. доступу: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=30717>

Служба атмосферних досліджень – Реж. доступу: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Bevis, M. S. Businger, T. A Herring, C. Rocken, R. A Anthes, and R. H. Ware (1992). "GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, pp.15,787-15,801.

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, N.5, pp. 599-608.

GNSS Data Center, Internet resurs: <http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>

Mendes V. B. (1999). Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques // Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report № 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 353 pp.

Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 1996, Vol.101, no. B2, pp. 3227–3246.

Ning T. GPS Meteorology: With Focus on Climate Applications. Thesis for The Degree of Doctor Of Philosophy. Department of Earth and Space Sciences Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden, 2012, pp. 82.

Rocken, C. "GNSS Meteorology – 1. GPS Observation Equation and Obtaining the Tropospheric Excess Phase". - Режим доступу: http://www.cosmic.ucar.edu/summercamp_2005/presentations/rocken_chris_20050526.pdf

Schueler, T. Tropospheric Correction Services for GNSS Users / T. Schueler and G.W. Hein - Concepts, Status and Future Prospects / University FAF Munich, Germany, 2002. – 9 p

Надійшла 11.04.2017 р.