

УДК 629.056.88+551.51

М. В. ПАЗЯК¹, Ф. Д. ЗАБЛОЦЬКИЙ²

¹Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел.: 066-27-38-901, ел. пошта: mvolosavchuk@ukr.net

²Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел.: 067-71-62-152, ел. пошта: fzablots@polynet.lviv.ua.

ПОРІВНЯННЯ ВОЛОГОЇ СКЛАДОВОЇ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ, ВИВЕДЕНОЇ ІЗ GNSS-ВИМІРЮВАНЬ, З ВІДПОВІДНОЮ ВЕЛИЧИНОЮ ІЗ РАДІОЗОНДУВАННЯ

Мета. Оцінити точність вологої складової зенітної тропосферної затримки, отриманої за даними шести GNSS-станцій порівняно з даними радіозондування. Визначення гідростатичної і вологої складових зенітної тропосферної затримки охопило кілька етапів. На першому етапі, з відповідного сайту, за даними центру опрацювання GNSS-вимірювань, вибирали усереднені значення зенітної тропосферної затримки. На другому етапі, застосовуючи аналітичну модель Saastamoinen, обчислювали гідростатичну компоненту, за точно вимірним (на висоті антени) значенням атмосферного тиску. На третьому етапі визначали вологу складову як різницю між значенням зенітної тропосферної затримки, виведеної із GNSS-вимірювань та її гідростатичною компонентою. Перевагами такого підходу у визначенні тропосферної затримки порівняно з іншими методами є безперервність GNSS-спостережень та незалежність їх від погодних умов. Отримані значення порівнювали з відповідними величинами, визначеними за даними радіозондування, які в цьому дослідженні приймали як контрольні. В результаті опрацювання 120-ти вертикальних профілів радіозондувань, на шести аерологічних станціях та за даними шести GNSS-станцій – обчислено значення гідростатичної і вологої компонент зенітної тропосферної затримки для середніх декад січня і липня 2011 та 2013 років. Дані радіозондувань опрацьовано за два роки, оскільки такий досить об'ємний і масивний матеріал дав змогу надійніше уточнити та оцінити, насамперед, характер отриманих значень гідростатичної складової тропосферної затримки, оскільки точність її визначення безпосередньо впливатиме на точність встановлення вологого складника. За результатами обчислень отримано різниці гідростатичної і вологої складових зенітної тропосферної затримки та оцінено їхню точність. Отримані результати слугують підґрунтям для подальшого підвищення точності визначення вологої складової із GNSS-вимірювань, зокрема для визначення просторово-часових змін та вмісту осаджуваної водяної пари в атмосфері в даному регіоні, що є важливим для прогнозування погоди.

Ключові слова: GNSS-вимірювання; радіозондування; зенітна тропосферна затримка; метеопараметри.

Вступ

Сьогодні GNSS-технології отримали широке застосування у різних сферах – геодезії, навігації, землеустрої тощо. Спостереження супутників GNSS можуть виконуватися у будь-який час доби, незалежно від метеорологічних умов. Однак під час проходження різних шарів атмосфери радіосигнал змінює швидкість внаслідок зміни показника заломлення. Величину цієї зміни у відстані, в зенітному напрямку, вздовж нейтральної атмосфери (стратосфери, тропосфери), називають зенітною тропосферною затримкою (ЗТЗ). Ця величина поділяється на дві складові гідростатичну і

вологу. Величина гідростатичної складової залежить, насамперед, від тиску повітря, тому її з порівняно високою точністю можна визначати шляхом аналітичного моделювання, за точно відомим атмосферним тиском на початковому рівні. Волога складова залежить від вмісту водяної пари в атмосфері, який безперервно змінюється і в просторі, і в часі. Тому змоделювати її із задовільною точністю в більшості випадків досить проблематично.

На сьогодні, завдяки добре розвиненій мережі активних референцних GNSS-станцій, зенітну тропосферну затримку, зокрема її вологу складову, визначають із GNSS-вимірювань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання впливу нейтральної атмосфери на результати GNSS-вимірювань, висвітлені в багатьох роботах, зокрема [Заблюцький Ф. Д., 2013; Каблак Н. І., 2010; Каблак Н. І., 2011; Каблак Н. І., Клімик, 2005; Кашкин В. Б., Петров Е. В., 2010; Voccolari M. et al, 2002; Ifadis I. M. et al, 2006; Mendes V. B., 1999; Ning T., 2012; Saastamoinen J., 1972; Schueler T., 2001]. Проте, досі ще остаточно не встановлено, з якою ж точністю визначається волога складова ЗТЗ, отримана за даними GNSS-спостережень.

Мета

Метою цієї роботи є аналіз точності вологої складової ЗТЗ, отриманої за даними шести GNSS-станцій [<http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>] порівняно з даними радіозондування [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>].

Методика

У роботі для аналізу зенітної тропосферної затримки використано вертикальні профілі основних метеорологічних величин: атмосферного тиску, температури повітря і відносної во-

вологості на заданих висотах, отриманих із радіозондувань. Дані відбирались за десятиденні періоди (здебільшого з 11-го по 20-те числа) січня й липня 2011 та 2013-го років на шести аерологічних станціях (див. табл. 1). Винятком є станція Київ, для якої замість 2011 року через недостатність відповідних даних вибрано 2009 рік. Загалом станції вибирались у центрально-східному регіоні Європи, що розміщені близько 50-ї паралелі, окрім станції Восійково (Санкт-Петербург, Росія), яка зміщена на 10° на північ. Щоб порівняти тропосферні затримки, отримані за даними радіозондування, з відповідними величинами, виведеними із GNSS-вимірювань, у пару до кожної аерологічної станції підбирали найближчі GNSS-станції з міркувань, що для обох станцій метеорологічні умови будуть приблизно однаковими. Оскільки в кожній парі аерологічна і GNSS-станції перебувають на різних висотах, то висота та метеопараметри аерологічної станції приводились до висоти GNSS-станції шляхом інтерполювання. Матеріали радіозондувань та GNSS-спостережень опрацьовано за два роки, щоб зменшити можливі аномалії величин складових ЗТЗ, притаманних якомусь одному року.

Таблиця 1

Координати аерологічних і GNSS-станцій

Table 1

Aerological and GNSS Station Coordinates

Аерологічні станції			GNSS-станції			Країна	Відстань, км
Широта 0° 00'	Довгота 0° 00'	Висота, м	Широта 0° 00'	Довгота 0° 00'	Висота, м		
Praha, 11520			GOPE			Чехія	28,0
50 00	14 27	303,0	49 54	14 47	592,6		
Poprad, 11952			GANP			Словаччина	1,2
49 02	20 18	706,0	49 02	20 19	745,2		
Voejkovo, 26063			PULK			Росія	28,8
59 57	30 41	78,0	59 46	30 20	101,2		
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		
Kyiv, 33345			GLSV			Україна	4,0
50 23	30 33	167,0	50 22	30 30	226,8		

Загальний підхід визначення ЗТЗ зводиться до кількох етапів. На першому етапі із GNSS-вимірювань для певної усередненої зенітної відстані виділяють повну тропосферну затримку за допомогою основного рівняння кодових або фазових псевдовідстаней GNSS-спостережень, яке має вигляд

$$P_r^s = \rho_r^s + c \cdot \delta t_r + c \cdot dt_{r,syst} - c \cdot \delta t^s - c \cdot dt_{syst}^s + d_{trop} + d_{ion} + \delta \rho_{rel} + \delta \rho_{mul} + \dots + \Delta, \quad (1)$$

де P_r^s і ρ_r^s – кодова псевдовідстань та геометрична відстань між супутником і приймачем; $c \cdot \delta t_r$ і $c \cdot \delta t^s$ – поправка годинника приймача і супутника; $dt_{r,syst}$ і dt_{syst}^s – затримки в приймачі і його антені та в супутнику і його антені; d_{trop} – повна тропосферна затримка; d_{ion} – іоносферна затримка; $\delta \rho_{rel}$ – поправка за релятивістські ефекти; $\delta \rho_{mul}$ – поправка за багатошляховість; Δ – помилка вимірювання.

Далі від тропосферної затримки d_{trop} переходять до її зенітної проекції d_{trop}^z , використовуючи функції відображення, наприклад, Niell, [Niell, A. E., 1996].

Отже, величину зенітної тропосферної затримки виражатимуть як суму гідростатичної і вологої складових:

$$d_{trop}^z = d_h^z + d_w^z. \quad (2)$$

На другому етапі визначають гідростатичну складову ЗТЗ, переважно за аналітичною моделлю Saastamoinen:

$$d_{hSA}^z = \frac{0.002277 \cdot P_0}{1 - 0.0026 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot H_0}, \quad (3)$$

де d_{hSA}^z – гідростатична складова ЗТЗ, отримана за формулою Saastamoinen; P_0 – приземне значення атмосферного тиску, гПа. H_0 – висота пункту над рівнем моря.

За наявності вертикальних профілів метеорологічних параметрів, отриманих шляхом радіозондування чи іншими підходами, гідростатичну складову визначають за інтегруванням показника заломлення з висотою [Заблоцький Ф. Д., 2002]:

$$d_{h aer}^z = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_d} N_h \cdot dH = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_d} K_1 \frac{P}{T} \left(1 - 0.378 \frac{e}{P} \right) \cdot dH, \quad (4)$$

де $d_{h aer}^z$ – гідростатична складова ЗТЗ, отримана за даними радіозондування; H_d – верхня межа прийнятої сухої атмосфери; N_h – гідростатична складова індексу показника заломлення для радіохвиль; dH – прошарок інтегрування; K_1 – емпіричний коефіцієнт індексу показника заломлення; P – атмосферний тиск; T – температура повітря за шкалою Кельвіна; e – парціальний тиск водяної пари.

На третьому етапі визначають вологу складову ЗТЗ як різницю між повним значенням ЗТЗ та її гідростатичною складовою:

$$d_{wGNSS}^z = d_{trop}^z - d_{hSA}^z, \quad (5)$$

де d_{wGNSS}^z – волога складова ЗТЗ, виведена із GNSS-вимірювань.

З метою порівняння вологої складової, виведеної із GNSS-вимірювань, її величину обчислено і за даними радіозондування за формулою [Заблоцький Ф. Д., 2002]:

$$d_{w aer}^z = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_w} N_w \cdot dH = 10^{-6} \int_{H_0}^{H_w} \left((K_2 - K_1 \cdot 0.622) \cdot \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_w^{-1} \cdot dH, \quad (6)$$

де $d_{w aer}^z$ – волога складова ЗТЗ, отримана за даними радіозондування; H_w – верхня межа 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.

Отримані результати та їх аналіз

В результаті опрацювання 120-ти вертикальних профілів радіозондувань, на шести аерологічних станціях, обчислено гідростатичну складову ЗТЗ за формулами (3) і (4), а також вологу складову за формулами (5) і (6). За даними GNSS-станцій отримано величини d_{trop}^z для кожного зондування.

Далі були обчислені різниці Δd_h^z і Δd_w^z :

$$\Delta d_h^z = d_{h_{aer}}^z - d_{h_{SA}}^z, \quad (7)$$

$$\Delta d_w^z = d_{w_{aer}}^z - d_{w_{GNSS}}^z. \quad (8)$$

Для оцінки отриманих різниць Δd_h^z і Δd_w^z обраховано середні квадратичні похибки m та середні квадратичні відхилення σ .

Зазначимо, що різниці Δd_h^z характеризують точність гідростатичної складової, визначеної за моделлю Saastamoinen, а різниці Δd_w^z – точність вологої складової, виведеної із GNSS-вимірювань, оскільки ці складові порівнювались із відповідними величинами, отриманими за даними радіозондування.

Таблиця 2

Різниці складових ЗТЗ за даними аерологічних та GNSS-станцій

Table 2

Differences of ZTD components obtained by the data of aerological and GNSS-stations

Станція	Роки	Різниці	Дні спостережень та місяці										m	σ
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
			Січень											
Praha-Libus	2011	Δd_h^z	0,1	-3,5	-1,7	-0,1	-3,4	-1,7	-3,6	-1,9	-2,4	-4,6	2,7	1,5
		Δd_w^z	-4,1	-11,8	-1,4	-3,1	-4,4	1,9	2,4	-8,2	-5,4	-2,5	5,5	4,3
	2013	Δd_h^z	-0,1	-1,0	2,0	-5,4	-2,6	-3,8	-2,7	-5,5	-6,7	-6,6	4,3	2,9
		Δd_w^z	-8,2	-7,3	-6,4	-2,6	-4,3	-5,7	-8,7	-1,2	-7,7	-4,3	6,1	2,5
Poprad-Ganovce	2011	Δd_h^z	-0,6	1,6	4,7	-3,4	-3,1	-4,8	-3,1	-3,9	-2,3	-2,9	3,3	2,9
		Δd_w^z	-4,0	-9,7	2,4	-10,2	-4,9	-10,1	-9,5	-6,5	-5,7	-9,2	7,7	4,0
	2013	Δd_h^z	0,0	-1,3	-1,5	-3,4	-3,3	-1,5	-2,1	0,2	-3,3	-2,5	2,2	1,3
		Δd_w^z	-4,9	-16,4	-15,6	-9,4	-10,8	-11,8	-19,6	-14,8	-15,8	-9,4	13,5	4,4
Legionowo	2011	Δd_h^z	0,1	-1,0	0,6	-2,4	2,2	-1,3	-0,8	-1,9	-0,7	-2,1	1,5	1,4
		Δd_w^z	-3,9	-11,0	-0,4	-8,0	-3,1	3,7	-2,2	-2,8	-8,1	-0,9	5,5	4,3
	2013	Δd_h^z	2,1	3,9	3,1	0,1	1,1	1,4	-0,5	0,7	1,1	1,4	1,9	1,3
		Δd_w^z	-10,0	32,6	-38,4	18,2	1,0	-14,2	16,0	37,7	4,8	9,1	22,3	22,7
Budapest	2011	Δd_h^z	1,0	-1,9	-1,6	-1,3	-1,1	-5,0	-1,8	-3,0	-2,4	-1,5	2,4	1,5
		Δd_w^z	-22,9	-11,6	-6,9	-7,6	-9,1	2,5	-6,4	-5,9	-2,3	-6,1	9,9	6,6
	2013	Δd_h^z	-0,9	2,2	1,3	1,2	2,6	1,8	5,8	5,8	2,3	3,8	3,2	2,1
		Δd_w^z	-3,5	-0,9	-4,5	-8,6	-11,8	-9,1	7,1	-12,9	-18,1	-13,9	10,3	7,3
Kyiv	2009	Δd_h^z	7,9	7,0	6,3	8,4	3,9	1,7	2,6	3,9	-0,5	2,8	5,2	2,9
		Δd_w^z	-0,2	-14,3	8,9	9,7	19,6	9,0	-6,0	0,7	-0,1	-18,8	11,1	11,7
	2013	Δd_h^z	5,0	6,4	5,6	6,1	8,4	7,1	6,1	8,7	7,2	3,8	6,6	1,5
		Δd_w^z	2,3	1,5	-8,9	-5,0	-0,4	6,8	-2,0	-3,5	0,4	-11,1	5,5	5,4
Voejkovo	2011	Δd_h^z	7,0	4,8	1,6	0,9	-0,9	1,9	4,3	5,7	5,0	3,5	4,1	2,5
		Δd_w^z	34,8	4,3	9,8	5,4	-8,1	4,6	10,6	-0,6	13,7	4,6	13,3	11,3
	2013	Δd_h^z	6,2	8,2	4,4	8,1	5,1	7,7	4,8	5,2	3,1	6,7	6,2	1,7
		Δd_w^z	-1,5	6,4	14,0	7,9	7,9	-3,0	13,0	10,3	13,5	13,8	10,1	6,2

Продовження табл. 2

Continue of Table 2

Станція	Роки	Різниці	Дні спостережень та місяці										m	σ
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
			Липень											
Praha-Libus	2011	Δd_h^z	-0,6	-1,2	-2,3	-2,4	-2,6	-3,1	-3,2	-2,4	-2,5	-2,8	2,4	0,8
		Δd_w^z	1,2	1,4	-25,9	-11,9	-18,8	-10,9	-15,0	-4,0	-13,3	-14,9	13,9	8,6
	2013	Δd_h^z	-2,7	-1,0	-2,5	-1,7	-2,1	-2,2	-2,1	-2,2	-2,1	-1,5	2,1	0,5
		Δd_w^z	-11,4	-6,2	-17,0	-12,4	-22,8	-19,3	-4,4	-8,7	-7,3	-19,9	14,3	6,4
Poprad-Ganovce	2011	Δd_h^z	-3,2	-4,9	-3,7	-2,5	-4,4	-2,2	-1,7	-3,2	-4,0	-4,5	3,6	1,1
		Δd_w^z	5,1	-16,8	-20,8	-11,3	-17,4	-32,5	-5,5	-33,5	21,4	-9,6	19,8	16,6
	2013	Δd_h^z	-3,9	-3,6	-4,2	-4,4	-4,5	-4,9	-4,1	-3,6	-3,7	-4,1	4,1	0,4
		Δd_w^z	-1,1	-8,6	-19,6	-18,0	-14,9	-7,2	-9,4	-12,4	-19,6	-31,5	16,4	8,5
Legionowo	2011	Δd_h^z	-4,6	-1,7	-1,1	-1,5	-2,7	-3,0	-2,0	-2,2	-2,8	-2,0	2,5	1,0
		Δd_w^z	-8,8	-2,2	-10,0	-8,1	2,3	3,2	0,5	6,2	-7,9	7,4	6,5	6,6
	2013	Δd_h^z	-1,3	-1,3	-3,2	-3,8	-2,9	-5,1	-2,0	-4,1	-3,7	-3,1	3,2	1,2
		Δd_w^z	-37,4	-15,0	-15,8	-10,9	12,6	27,4	-2,1	-1,0	-0,3	-22,6	18,5	18,2
Budapest	2011	Δd_h^z	-2,9	-2,6	-3,7	-3,2	-2,8	-2,4	-3,3	-2,5	-3,2	-3,8	3,1	0,5
		Δd_w^z	4,3	-21,7	-15,5	-22,1	-14,9	-19,7	-18,7	-10,1	-13,7	-10,8	16,1	7,8
	2013	Δd_h^z	-3,2	-3,7	-2,2	-2,6	-2,3	-3,1	-2,3	-4,0	-3,7	-3,4	3,1	0,6
		Δd_w^z	-14,6	-8,9	-15,0	-14,9	-10,7	-34,6	-2,2	-13,3	-9,5	-0,5	15,2	9,3
Kyiv	2009	Δd_h^z	0,5	-1,3	-2,5	-0,7	-3,9	-2,5	-3,1	-1,7	-0,7	-2,0	2,2	1,3
		Δd_w^z	9,8	10,6	12,6	17,8	30,2	-26,5	8,4	-27,2	-23,9	0,7	19,2	20,2
	2013	Δd_h^z	-1,5	-2,7	-2,5	-4,7	-4,0	-1,2	-4,1	-4,3	-4,6	-3,5	3,5	1,3
		Δd_w^z	-8,5	-7,0	-33,0	-2,1	7,9	0,0	-6,3	3,4	23,2	12,2	14,2	14,9
Voejkovo	2011	Δd_h^z	0,4	-0,9	-0,7	-2,1	-0,7	-0,9	-1,5	-0,9	-0,3	-0,4	1,0	0,7
		Δd_w^z	39,0	15,2	-1,5	11,3	2,6	-2,6	-13,2	17,9	19,7	-20,9	17,9	17,5
	2013	Δd_h^z	-1,4	1,2	-1,6	-0,4	0,9	0,6	-2,5	-1,5	-0,5	-2,4	1,5	1,3
		Δd_w^z	25,2	21,0	6,1	-0,4	18,5	7,5	0,7	-2,0	1,3	14,3	13,1	9,9

У табл. 2 представлено результати обчислень. Як видно з табл. 2, за результатами спостережень 2011 року похибка гідростатичної складової за даними моделі Saastamoinen і для січня, і для липня лежить у межах 5 мм, що характерно для групи центрально-європейських станцій, а саме Praha-Libus, Poprad-Ganovce, Legionowo та Budapest. Для східноєвропейських

станцій Kyiv і Voejkovo вона становить 7–8 мм. Ця відмінність у 2–3 мм може бути спричинена різним технічним обладнанням станцій. Практично аналогічна картина, за винятком декількох дат, спостерігається і за даними вимірювань у 2013 році.

Що стосується вологої складової, виведеної з GNSS-вимірювань у 2011 році, то тут слід

зазначити таке: для групи центральноєвропейських станцій величини різниць коливаються від -30 до $+10$ мм і мають, здебільшого, від'ємний характер, що вказує на систематичне зміщення. За даними GNSS-станцій, GLSV та PULK волога складова приймає і від'ємний, і додатний характер, а її похибка перебуває в межах від -30 до $+40$ мм. Схожа ситуація спостерігається і за даними вимірювань у 2013 році. Дещо більш контрастно у 2013 р. виділяється станція Legionowo (див. рис. 1, 2, що є нагляднішим порівняно з табличним представленням). Така зміна може бути спричинена різними погодними умовами або якимись порушеннями в роботі станції.

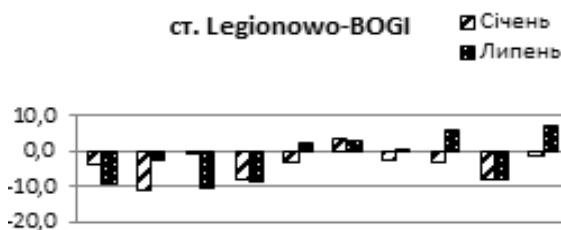


Рис. 1. Волога складова, 2011 р.

Fig. 1. Wet component, 2011

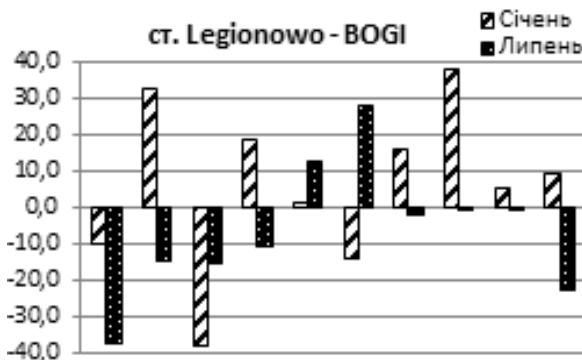


Рис. 2. Волога складова, 2013 р.

Fig. 2. Wet component, 2013

Наукова новизна і практична значущість

За результатами обчислень оцінено точність гідростатичної і вологої складових зенітної тропосферної затримки. Отримані результати слугують підґрунтям для подальшого підвищення точності визначення вологої складової ЗТЗ із GNSS-вимірювань, зокрема, для визначення просторово-часових змін та вмісту осаджуваної водяної пари в атмосфері в даному регіоні, що є важливим для прогнозування погоди.

Висновки

На основі опрацювання даних оцінено гідростатичну складову, отриману за моделлю Saastamoinen, а також вологу складову зенітної тропосферної затримки, виведену із GNSS-вимірювань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Заблоцький Ф. Д. ГНСС-метеорологія: навч. посіб. / Ф. Д. Заблоцький. – Львів: Вид-во Львівської політехніки. – 2013. – 95 с.
- Заблоцький Ф. Д. Моделювання впливу атмосфери на астрономогеодезичні виміри в полярних регіонах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.24.01 / Заблоцький Федір Дмитрович; Національний ун-т “Львівська політехніка”. — Л., 2002. — 267 с.
- Каблак Н. І. Оцінка впливу атмосфери у мережі активних референціальних GNSS-станцій / Н. І. Каблак // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2010. – Вип. 73. – С. 17–21.
- Каблак Н. І. Дистанційне зондування водяної пари в атмосфері за допомогою навігаційних супутникових систем / Н. І. Каблак // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2011. – Вип. 75. – С. 31–35.
- Каблак Н. І. Моніторинг осаджуваної водяної пари на основі обробки ГНСС-даних / Н. І. Каблак // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17. – № 4. – С. 65–73.
- Каблак Н. І. Застосування GPS-спостережень для дослідження вологості атмосфери / Н. І. Каблак, В. І. Клімич // Geoinformation monitoring of environment GPS and GIS technologies: X Jubilee International Scientific and Technical Symposium, 6–11 Sept., 2005, Alushta (Ukraine, Crimea). – 2005. – P. 255–257;
- Кашкин В. Б. Оценка тропосферной задержки сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS с использованием спутниковых данных ATOVS о вертикальных профилях атмосферы / В. Б. Кашкин, Е. В. Петров // Изв. вуз. Физ. – 2010. – № 9 (2). – С. 27–29.
- Служба атмосферних досліджень при університеті Вайомінгу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- 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. – P. 599–608.

- GNSS Data Center [Electronic resource]. – Mode of access: <http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>
- Ifadis I. M., Katsougiannopoulos S., Pikridas C., Rosikopoulos D., and Fotiou A. Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radiosonde 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. – P. 35.
- Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research, 1996, Vol. 101, No. B2. – P. 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. – P. 82.
- Saastamoinen J. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radioring if satellites. Geophysical monograph, 15, American Geophysical Union, Washington, 1972. – P. 247–252.
- Schueler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation: PhD Thesis. Munich: Universitaet der Bundeswehr, 2001. – P. 364.

М. В. ПАЗЯК¹, Ф. Д. ЗАБЛОЦКИЙ²

¹Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, тел.: 066-27-38-901, эл. почта: mvolsavchuk@ukr.net

²Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, тел.: 067-71-62-152, эл. почта: fzablots@polynet.lviv.ua.

СРАВНЕНИЕ ВЛАЖНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЗЕНИТНОЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ, ВЫВЕДЕННОЙ ИЗ GNSS-ИЗМЕРЕНИЙ, С СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ВЕЛИЧИНОЙ С РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Целью работы является оценить точность влажной составляющей зенитной тропосферной задержки, полученной по данным шести GNSS-станций по сравнению с данными радиозондирования. Определение гидростатической и влажной составляющих зенитной тропосферной задержки делилось на несколько этапов. На первом этапе, с соответствующего сайта по данным центра обработки GNSS-измерений, выбирались усредненные значения зенитной тропосферной задержки. На втором этапе, применяя аналитическую модель Saastamoinen, исчислялась гидростатическая компонента, по точно измеренным (на высоте антенны) значениям атмосферного давления. На третьем этапе определялась влажная составляющая, как разница между значением зенитной тропосферной задержки, выведенной из GNSS-измерений и ее гидростатической компонентой. Преимуществами такого подхода при определении тропосферной задержки по сравнению с другими методами является непрерывность GNSS-наблюдений и независимость их от погодных условий. Полученные значения сравнивались с соответствующими величинами, определенными по данным радиозондирования, которые в данном исследовании принимались как контрольные. В результате обработки 120-ти вертикальных профилей радиозондирования, на шести аэрологических станциях и по данным шести GNSS-станций – вычислено значение гидростатической и влажной компонент зенитной тропосферной задержки для средних декад января и июля 2011 и 2013. Данные радиозондирования обработаны за два года, поскольку такой достаточно объемный и массивный материал позволил надежнее уточнить и оценить, прежде всего, характер полученных значений гидростатической составляющей тропосферной задержки, так как точность ее определения непосредственно будет влиять на точность определения влажной составляющей. По результатам вычислений получено разницы гидростатической и влажной составляющих зенитной тропосферной задержки и оценена их точность. Полученные результаты служат основой для дальнейшего повышения точности определения влажной составляющей с GNSS-измерений, в частности, для определения пространственно-временных изменений и содержания осаждаемых водяного пара в атмосфере в данном регионе, что важно для прогнозирования погоды.

Ключевые слова: GNSS-измерения; радиозондирование; зенитная тропосферная задержка; метеопараметры.

M. V. PAZIAK¹, F. D. ZABLOTSKYI²

¹Department "Higher geodesy and astronomy" of Lviv polytechnic National university, 12 Bandera street, Lviv, Ukraine, 79013, tel.: 066-27-38-901, e-mail mvolsavchuk@ukr.net

²Department "Higher geodesy and astronomy" of Lviv polytechnic National university, 12 Bandera street, Lviv, Ukraine, 79013, tel.: 067-71-62-152, e-mail fzablots@polynet.lviv.ua.

COMPARISON OF THE WET COMPONENT OF ZENITH TROPOSPHERIC DELAY DERIVED FROM GNSS OBSERVATIONS WITH CORRESPONDING VALUE FROM RADIO SOUNDINGS

The purpose of this paper is to evaluate an accuracy of the wet component of zenith tropospheric delay obtained by the data of six GNSS stations in comparison with radio sounding data. The determination of hydrostatic and wet components of zenith tropospheric delay was divided into several stages. In the first phase, with an appropriate site for data center processing GNSS-measurements averaged values of zenith tropospheric delay were selected. In the second step, using an analytical model of Saastamoinen, a hydrostatic component was calculated, with precisely measured (at the height of the antenna) value of atmospheric pressure. The third phase a wet component was determined as the difference between zenith tropospheric delay, derived from GNSS measurements and its hydrostatic component. The advantages of this approach in determining the tropospheric delay in comparison with other methods is continuity of GNSS observations and their independence of weather conditions. The obtained values were compared with the corresponding values determined according to the radio soundings, which were taken in this study as controls. As a result of processing of 120 vertical profiles of radio soundings, at six aerological stations and by the data from six GNSS stations the value of hydrostatic and wet component of zenith tropospheric delay was calculated for middle ten day period of January and July 2011 and 2013. Radio soundings data worked for two years, so a fairly lengthy and massive material is allowed to refine and evaluate reliable primarily the nature of the values of the hydrostatic component of tropospheric delay so as exactness of its determination directly will influence on exactness of establishment of moist component. In consequence of our calculations, the difference hydrostatic and wet components of the tropospheric zenith delays were obtained and their accuracy was assessed. These results serve as a basis for further improving of the accuracy of the wet component of GNSS-measurements, in particular, to determine the spatial and temporal changes and precipitable water vapor content in the atmosphere in the region, which is important for weather forecasting.

Keywords: GNSS-measurements; radio soundings; zenith tropospheric delay; meteorological parameters

REFERENCES

- Zablotskyi F. D. GNSS-meteorologiya: [GNSS meteorology]. Navchalnyi posibnyk [tutorial]. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2013, pp. 95.
- Zablotskyi F. D. Modeliuvannya vplyvu atmosfery na astronomoheodezychni vymiry v poliarnykh rehionakh [Modeling the influence of the atmosphere on astronomic and geodetic measurements in polar regions] dys. d-ra tekhn. nauk [Thesis of Doctor of Science]. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2002, pp. 267.
- Kablak N. I. Ocinka vplyvu atmosfery u merezhi aktyvnykh referencykh GNSS-stanciy [Assessing the impact of the atmosphere on a network of active references GNSS-stations]. Geodeziia, kartografiia i aerofotoznimannia [Geodesy, Cartography and Aerial Photography], 2010, issue. 73, pp. 17–21.
- Kablak N. I. Dystantsiine zonduvannya vodianoi pary v atmosferi za dopomohoiu navihatsiinykh suputnykovykh system [Remote sensing of water vapor in the atmosphere using satellite navigation systems]. Geodeziia, kartografiia i aerofotoznimannia [Geodesy, Cartography and Aerial Photography], 2011, issue 75, pp. 31–35.
- Kablak N. I. Monitorynh osadzhuvanoi vodianoi pary na osnovi obrobky GNSS-danykh [Monitoring precipitable water vapor from GNSS data processing]. Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space science and technology]. 2011, vol. 17, no. 4, pp. 65–73.
- Kablak N. I., Klimyk V. I. Zastosuvannya GPS-sposterezhen dlia doslidzhennia volohosti atmosfery [Usage GPS-observations to research the humidity of the atmosphere]. Geoinformation monitoring of environment GPS and GIS technologies: X Jubilee International Scientific and Technical Symposium, 6-11 Sept., 2005, Alushta (Ukraine, Crimea). 2005, pp. 255–257;
- Kashkin V. B., Petrov E. V. Otsenka troposfernoy zaderzhki signalov navigatsionnykh sistem GLONASS i GPS s ispolzovaniem sputnikovykh dannykh ATOVS o vertikalnykh profilyah atmosfery [Estimation of tropospheric delay signals navigation systems GLONASS and GPS, using satellite data ATOVS vertical profiles of the

- atmosphere]. *Izv. vuz. Fiz.* [Proceedings of the higher educational institutions of Physics] 2010, No. 9 (2), pp. 27–29.
- Sluzhba atmosferyh doslidzhen pry universyteti Vajomingu, Internet resurs [Rezhyim dostupu]: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Boccolari M., Fazlagic S., Frontero P., Lombroso L., Pugnaghi S., Santangelo R., Corradini S., 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 [Rezhyim dostupu]: <http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>
- Katsougiannopoulos S., Pikridas C., Rossikopoulos D., i. Ifadis M. and Fotiou A. Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radiosonde Measurements and Permanent GPS Data. PS5.4 – GNSS Processing and Applications, XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8–13, 2006, pp. 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, pp. 35.
- 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.
- Saastamoinen J. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radioranging if satellites. *Geophysical monograph*, 15, American Geophysical Union, Washington, 1972, pp. 247–252.
- Schueler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation: PhD Thesis. Munich: Universitaet der Bundeswehr, 2001, pp. 364.

Надійшла 7.11.2014 р.