



ОЦІНЮВАННЯ ГІДРОСТАТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ ЗА ДАНИМИ РАДІОЗОНДУВАННЯ

На основании данных радиозондирования на шести аэрологических станциях определены показания гидростатической составляющей зенитной тропосферной задержки. Эти данные сравниваются с соответствующими результатами, полученными с использованием аналитической модели Saastamoinen. Даны рекомендации по дальнейшим исследованиям в этом направлении.

According to the radio sounding data at six aerological stations values of hydrostatic component of zenith tropospheric delay have been determined. These data are compared with correspond findings obtained by use of analytical Saastamoinen model. Recommendations for further research in this direction are given.

Постановка проблеми. Зенітна тропосферна затримка (ЗТЗ) визначається як традиційними методами, так і супутниковими.

До перших відносять:

аерологічне зондування, зокрема радіозондування;

аналітичні моделі, розроблені здебільшого на основі усереднених моделей стану атмосфери.

Друга група визначення ЗТЗ охоплює насамперед:

- безпосередні GNNS-вимірювання у мережах активних референціальних станцій;

- поєднання даних GNNS-зніманих з даними з низькоорбітальних супутників (GPS-RO);

Радіозондування дає найточніші результати безпосередніх контактних вимірювань термодинамічних параметрів атмосфери на висотах до 30-35 км. Вони містять відомості про вертикальні профілі температури, характеристики вологості, швидкості й напрямку вітру [6]. Зондування проводиться на аерологічних станціях, які здебільшого призначені для обслуговування роботи аеропортів і є основою світової аерологічної мережі. Опрацювання даних радіозондування дозволяє надійно визначити величину ЗТЗ, що важливо для підвищення точності GNNS-вимірювань.

Проте суттєвим недоліком застосування результатів радіозондування для забезпечення якісних результатів GNNS-вимірювань є відносно тривалий період одного сеансу зондувань. Метеорологічні параметри починають фіксуватись у момент запуску кулі-зонда і завершуються в момент досягнення ним максимальної висоти (понад 30 км), що триває близько години. Якщо за цей час різко змінюються метеорологічні умови, то побудований за показаннями зонда профіль значень заломлення вже не відображатиме справжню ситуацію.

Зважаючи на надто складний організаційний і затратний процес радіозондування на пунктах GNNS-спостережень, на практиці ЗТЗ визначають за допомогою аналітичних моделей. Як відомо, ЗТЗ поділяють на гідростатичну та вологу складову. Гідростатичну складову можна визначити дово-

лі точно лише при наявності точних значень атмосферного тиску на висоті GNNS-антени в момент спостережень за певними аналітичними моделями, зокрема Saastamoinen-моделлю, яку покладено в основу багатьох програм для опрацювання GNNS-вимірів.

Вологу затримку змодельовати набагато складніше через нерівномірний розподіл та постійний рух водяної пари в тропосфері.

Нині ЗТЗ визначають у центрах опрацювання GNNS-вимірів у мережах референціальних станцій. Усереднені значення повної зенітної тропосферної затримки подаються на відповідних сайтах з хвилинним інтервалом протягом усієї доби. Користувач при потребі визначає вологу складову як різницю між повною ЗТЗ і гідростатичною складовою, обчисленою за модельним представленням. Перевагами такого підходу в порівнянні з іншими методами є безперервність GNNS-спостережень та незалежність їх від погоди.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останній час опубліковано чимало праць, зокрема [1, 2, 4, 5], в яких висвітлюються питання підвищення точності визначення складових ЗТЗ. У більшості з них акцентовано увагу на визначенні гідростатичної складової, оскільки точність її визначення безпосередньо впливатиме на точність встановлення вологого складника. Разом з тим питання точності визначення гідростатичної складової ЗТЗ лишається відкритим.

Постановка завдання. Мета даного дослідження – оцінити точність визначення гідростатичної складової ЗТЗ за моделлю Saastamoinen та порівняти її з відповідною величиною, отриманою за даними радіозондування.

Виклад основного матеріалу. 1. Характеристика вихідних даних. За вихідні дані в дослідженні обрано вертикальні профілі основних метеорологічних величин, отриманих із радіозондувань 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 р. через відсутність відповідних даних було взято 2009-й рік [7]. Загалом станції обирались у центрально-східному



Таблиця 1. Координати аерологічних станцій

Назва і номер станції	Країна	Широта, градуси і минути	Довгота, градуси і минути	Висота, м
Прага, 11520	Чехія	50 00	14 27	303,0
Попрад, 11952	Словаччина	49 02	20 19	706,0
Восейково, 26063	Росія	59 57	30 41	78,0
Легіоново, 12374	Польща	52 23	20 57	96,0
Будапешт, 12843	Угорщина	47 25	19 10	139,0
Київ, 33345	Україна	50 23	30 33	167,0

регіоні Європи, що розміщені поблизу 50-ї паралелі. Винятком стала станція Восейково (Санкт-Петербург, Росія), зміщена на 10° на північ. Було опрацьовано матеріали радіозондувань за два роки з метою уточнення характеру отриманих значень гідростатичної складової ЗТЗ. Такий досить об'ємний і масивний матеріал дозволив надійніше оцінити точність гідростатичної складової ЗТЗ (у середніх широтах). У свою чергу це дало змогу оцінити точність вологої складової ЗТЗ із GNNS-вимірювань, а за цією величиною – і вміст водяної пари в атмосфері.

2. Загальний підхід до визначення гідростатичної складової ЗТЗ. Як уже було сказано, зенітна тропосферна затримка складається з двох частин – гідростатичної та вологої.

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

Гідростатичну складову можна визначити за кількома моделями, зокрема за моделлю Saastamoinen:

$$d_h^z = \frac{0,002277 \cdot P_s}{1 - 0,0026 \cdot \cos 2\varphi - 0,0028 \cdot H_s} \quad (2)$$

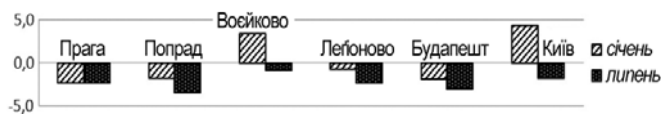
де φ і H_s – широта і висота пункту спостережень; P_s – значення приземного атмосферного тиску, гПа, або за формулою

$$d_h^z = 10^{-6} \cdot K_1 \cdot R_d \cdot \frac{P_s}{g_m} \quad (3)$$

де $g_m = 9,784(1 - 0,0026 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 \cdot H_s)$ – прискорення вільного падіння в центрі мас вертикального стовпа повітря; $K_1 = 77,624$ – емпіричний коефіцієнт; $R_d = 287,06 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$ – питома газова стала сухого повітря.

3. Аналіз усереднених значень гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки. Усереднені значення різниць гідростатичної складової ЗТЗ Δd_h^z (мм) для середніх декад січня і липня ілюструють гістограми (мал. 1 і 2). Значення Δd_h^z обчислено як різницю між гідростатичною складовою, визначеною за даними радіозондування, і відповідним значенням, знайденим за формулою Saastamoinen.

Проаналізувавши усереднені різниці Δd_h^z за січень, виявлено, що ці різниці переважно менші за

Мал. 1. Усереднені значення Δd_h^z за середні декади січня та липня 2011 р.Мал. 2. Усереднені значення Δd_h^z за середні декади січня та липня 2013 р.

5 мм і лише на станціях Восейково та Київ (січень 2013 р.) вони становлять відповідно 6,2 і 6,6 мм. Щодо значень цього показника за липень, то слід визнати, що всі вони від'ємні та не перевищують за абсолютною величиною -4,1 мм.

Для того щоб перейти до аналізу величини Δd_h^z на кожній станції на окремі дати, наведемо її значення в числовому вигляді (табл. 2).

Таблиця 2. Різниці Δd_h^z за окремі дати

Станція	Роки	Дні спостережень та місяці										Сер. знач. Δd_h^z
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Січень												
Прага	2011	0,1	-3,5	-1,7	-0,1	-3,4	-1,7	-3,6	-1,9	-2,4	-4,6	-2,3
	2013	-0,1	-1,0	2,0	-5,4	-2,6	-3,8	-2,7	-5,5	-6,7	-6,6	-3,3
Попрад	2011	-0,6	1,6	4,7	-3,4	-3,1	-4,8	-3,1	-3,9	-2,3	-2,9	-1,8
	2013	0,0	-1,3	-1,5	-3,4	-3,3	-1,5	-2,1	0,2	-3,3	-2,5	-1,9
Восейково	2011	7,0	4,8	1,6	0,9	-0,9	1,9	4,3	5,7	5,0	3,5	3,4
	2013	6,2	8,2	4,4	8,1	5,1	7,7	4,8	5,2	3,1	6,7	6,0
Легіоново	2011	0,1	-1,0	0,6	-2,4	2,2	-1,3	-0,8	-1,9	-0,7	-2,1	-0,7
	2013	2,1	3,9	3,1	0,1	1,1	1,4	-0,5	0,7	1,1	1,4	1,4
Будапешт	2011	1,0	-1,9	-1,6	-1,3	-1,1	-5,0	-1,8	-3,0	-2,4	-1,5	-1,9
	2013	-0,9	2,2	1,3	1,2	2,6	1,8	5,8	5,8	2,3	3,8	2,6
Київ	2009	7,9	7,0	6,3	8,4	3,9	1,7	2,6	3,9	-0,5	2,8	4,4
	2013	5,0	6,4	5,6	6,1	8,4	7,1	6,1	8,7	7,2	3,8	6,4
Липень												
Прага	2011	-0,6	-1,2	-2,3	-2,4	-2,6	-3,1	-3,2	-2,4	-2,5	-2,8	-2,3
	2013	-2,7	-1,0	-2,5	-1,7	-2,1	-2,2	-2,1	-2,2	-2,1	-1,5	-2,0
Попрад	2011	-3,2	-4,9	-3,7	-2,5	-4,4	-2,2	-1,7	-3,2	-4,0	-4,5	-3,4
	2013	-3,9	-3,6	-4,2	-4,4	-4,5	-4,9	-4,1	-3,6	-3,7	-4,1	-4,1
Восейково	2011	0,4	-0,9	-0,7	-2,1	-0,7	-0,9	-1,5	-0,9	-0,3	-0,4	-0,8
	2013	-1,4	1,2	-1,6	-0,4	0,9	0,6	-2,5	-1,5	-0,5	-2,4	-0,7
Легіоново	2011	-4,6	-1,7	-1,1	-1,5	-2,7	-3,0	-2,0	-2,2	-2,8	-2,0	-2,4
	2013	-1,3	-1,3	-3,2	-3,8	-2,9	-5,1	-2,0	-4,1	-3,7	-3,1	-3,0
Будапешт	2011	-2,9	-2,6	-3,7	-3,2	-2,8	-2,4	-3,3	-2,5	-3,2	-3,8	-3,0
	2013	-3,2	-3,7	-2,2	-2,6	-2,3	-3,1	-2,3	-4,0	-3,7	-3,4	-3,0
Київ	2009	0,5	-1,3	-2,5	-0,7	-3,9	-2,5	-3,1	-1,7	-0,7	-2,0	-1,8
	2013	-1,5	-2,7	-2,5	-4,7	-4,0	-1,2	-4,1	-4,3	-4,6	-3,5	-3,3

Проаналізувавши за табл. 2 різниці Δd_h^z за ступенем змін їх значень, зауважимо таке:

- за результатами спостережень у січні 2011 р. станції можна розділити на дві групи, а саме центральноевропейську і східноевропейську. Так, у першій групі станцій (Прага, Попрад, Легіоново і Будапешт) різниці Δd_h^z набувають переважно від'ємних значень, що не перевищують за абсолютною величиною -5 мм. На станціях другої групи



(Воейково і Київ) ці різниці мають в основному додатний знак, змінюючись від 8,4 до -0,9 мм;

- за січень 2013 р. відмінність показників у групах станцій дещо нівелюється тим, що на станціях Легіоново і Будапешт зафіксовано лише невеликі різниці додатних значень і вони менші за 6 мм. На інших станціях як першої, так і другої груп характер різниць загалом залишається як у попередньому періоді;

- за результатами липня 2011 р. різниці Δd_h^z на всіх станціях від'ємні й коливаються від -4,9 до 0,4 мм;

- за липень 2013 р. різниці Δd_h^z для більшості станцій від'ємні й коливаються в межах від -5,1 до -0,5 мм і лише на станції Воейково у трьох випадках вони додатні, але не перевищують 1,2 мм.

Висновки та рекомендації. У статті розглядаються відмінності між значеннями гідростатичної складової ЗТЗ, отриманими за даними радіозондування та за моделлю Saastamoinen за середні декади січня і липня 2011-го та 2013-го років на шести аерологічних станціях. Власне, ці різниці й передають точність гідростатичної складової. У літній період вони мають від'ємний знак, що вказує на систематичне зміщення, а в зимовий – як від'ємний, так і додатний.

У подальшому отримані результати будуть використані для аналізу вологої складової зенітної тропосферної затримки, одержаної в ході GNSS-вимірювань, оскільки при цьому для визначення гідростатичної складової використовується саме модель Saastamoinen.

Література

1. *Заблоцький, Ф.Д.* ГНСС-метеорологія: навчальний посібник / Ф.Д. Заблоцький. – Л.: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – 95 с.
2. *Заблоцький, Ф.Д.* Особливості формування вологої складової тропосферної затримки в різних регіонах / Ф.Д. Заблоцький // "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва": зб. наук. пр. – Л.: Ліга-Прес, 2002. – С. 121-127.
3. *Заблоцький, Ф.Д.* Суха і гідростатична складові зенітної тропосферної затримки / Ф.Д. Заблоцький Б.Б. Паляниця, Л.В. Матвієнко, Н.В. Турчин // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л.: Ліга-Прес, 2011. – С. 92-95.
4. *Каблак, Н.І.* Оцінка впливу атмосфери у мережі активних референційних GNSS-станцій / Н.І. Каблак // Геодез., картогр. і аерофотознім. – 2010. – Вип. 73. – С. 17-21.
5. *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.

Інтернет-джерела

6. *Радиозондирование атмосферы.* – Реж. доступу: <http://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID=30717>
7. *Служба атмосферних досліджень при університеті Вайомінга.* – Реж. доступу: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Надійшла 03.09.14