

МОДИФІКОВАНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СУХОЇ СКЛАДОВОЇ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ У ПІВДЕННО-ЗАХІДНОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ

© Заблоцький Ф.Д., Паляниця Б.Б., 2004

Выполнен анализ основных методов учета сухой составляющей зенитной тропосферной задержки и разработаны модифицированные модели для её определения в условиях Юго-Западного региона Украины.

An analysis of the basic methods of the taking into account of the dry component of zenit tropospheric delay has been carried out and modified models for determination of it in the South-West region of Ukraine have been developed.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день прийнято вважати, що точність визначення сухої складової зенітної тропосферної затримки d_d^z забезпечується на рівні 1 мм за допомогою, наприклад, моделі Саастамойнена, а проблему становить лише точність визначення вологої складової d_w^z внаслідок неоднорідності розподілу водяної пари з висотою. Проте, як виявлено із попередніх наших досліджень, точність визначення сухої складової за відомими аналітичними моделями включно з моделлю Саастамойнена є значно нижчою вказаного рівня. З метою уточнення цього питання в даній роботі проводиться аналіз точності визначення сухої складової зенітної тропосферної затримки довготривалого ряду аерологічного зондування атмосфери на станції Одеса.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з даної проблеми. Як свідчить аналіз літературних джерел як зарубіжних так і вітчизняних, серед яких роботи [1-4], на сьогоднішній день, повне значення тропосферної затримки розглядають як добуток значення поправки в зеніті на відповідну функцію відображення. При використанні біекспоненційної моделі показника заломлення тропосферну затримку розділяють на суху та вологу складові, що дає змогу комбінувати різні моделі для визначення тропосферної затримки, використовуючи зенітну тропосферну поправку одного автора, а функцію відображення – іншого. Таким чином, проблему підвищення точності визначення атмосферної затримки, розрахованої за аналітичними моделями, можна вирішувати як уточненням зенітного значення складових поправки, так і підбором найбільш відповідних функцій відображення. Дана праця присвячена дослідженням, направленим на підвищення точності визначення зенітного значення саме сухої складової тропосферної затримки.

Невирішені частини загальної проблеми полягають у тому, що більшість відомих і широко використовуваних до сьогодні аналітичних моделей для врахування сухої складової чи тропосферної затримки в цілому у результаті радіотехнічних вимірів, розроблялись переважно на основі глобально усереднених аерологічних профілів або стандартних атмосфер, отриманих переважно для середніх широт західної півкулі і тому не можуть врахувати регіональних кліматичних особливостей, які суттєво впливають на величину тропосферної затримки.

Постановка завдання полягає в тому, щоб на основі проведеного аналізу величини сухої складової зенітної тропосферної затримки за даними аерологічного зондування та за аналітичними моделями модифікувати класичну модель Саастамойнена з метою підвищення точності визначення сухої складової та провести оцінку точності отриманої моделі.

Аналіз величини сухої складової зенітної тропосферної затримки за даними аерологічного зондування

Оброблено довготривалий ряд аерологічних профілів, отриманих в різні сезони року, а саме в літній і зимовий періоди на станції Одеса. При цьому до літнього сезону ми віднесли період червень-вересень включно, який характеризується приземними температурами повітря $+15^{\circ}\text{C}$ і вище.

До зимового періоду включені аерологічні дані з приземними температурами $+5^{\circ}\text{C}$ і нижче. Вибіркові характеристики величин d_d^z наведені в табл.1.

Таблиця 1

Різниця сухих складових для різних сезонів за моделями
атмосфери з однаковим приземним значенням атмосферного тиску

Дата	P_0 , гПа	t_0 , $^{\circ}\text{C}$	$d_d^z(\text{aerol})$ мм	Дата	P_0 , гПа	t_0 , $^{\circ}\text{C}$	$d_d^z(\text{aerol})$ мм	d_d^z (зима)- d_d^z (літо)
Літній період				Зимовий період				
20.07	1011	20,0	2291	8.02	1011	-3,8	2309	18
19.07	1012	15,0	2297	7.12	1012	2,5	2305	8
23.07	1005,5	22,0	2280	16.12	1005	-0,4	2290	10
10.08	1009	20,8	2288	12.03	1008,3	0,4	2298	10
12.08	1004,5	20,9	2276	16.12	1005	-0,4	2290	14

Причому для порівняння величин d_d^z , отриманих у літній та зимовий періоди, підібрано попарно профілі з однаковими значеннями приземного атмосферного тиску P_0 .

Як видно з табл.1, в зимовий період значення d_d^z перевищують аналогічні дані для літа на величину 10 мм і більше. Це можна пояснити двома причинами: по-перше, при однакових значеннях повного атмосферного тиску величина його сухої складової $P - e$ для літа є меншою за відповідну величину для зимового періоду внаслідок більшого парціального тиску e у літній період; по-друге, згідно з законом статичної атмосфери тиск повітря спадає зі збільшенням висоти швидше у холодніших масах атмосфери, ніж у тепліших, що підтверджують дані табл.2.

У табл.2 приведено атмосферний тиск, температуру повітря для двох дат через 1 км по висоті в межах усієї тропосфери. У колонці 8 цієї таблиці вказані другі різниці атмосферного тиску $\delta\delta P$:

$$\delta\delta P = \delta P(8.02) - \delta P(20.07), \quad (1)$$

де перші різниці обчислені для кожної дати, як:

$$\delta P = P_{i+1} - P_i, \quad (2)$$

а P_i і P_{i+1} – значення атмосферного тиску на i -тому та $i+1$ рівнях, відповідно.

Таблиця 2

Зміна атмосферного тиску і часток сухої складової зенітної тропосферної затримки з висотою в зимовий і літній періоди на станції Одеса

H , км	20.07			8.02			$\delta\delta P$	δd_d^z
	P_0 , гПа	$t^\circ C$	d_d^z мм	P_0 , гПа	$t^\circ C$	d_d^z мм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,04	1011	20,0	239,8	1011	-3,8	265,8	-	26,0
1	904,3	15,4	229,4	893,8	-10,8	247,8	10,4	18,4
2	802,8	10,1	206,2	785,0	-13,0	221,4	7,3	15,2
3	711,5	7,1	186,0	687,7	-17,0	195,6	6,0	9,6
4	629,1	0,4	168,6	601,4	-18,9	174,0	3,9	5,4
5	554,8	-5,0	152,2	525,0	-25,5	155,9	2,1	3,7
6	487,7	-12,8	137,8	456,5	-33,0	139,6	1,4	1,8
7	427,0	-20,0	123,6	395,0	-40,9	125,0	0,8	1,4
8	372,5	-25,1	110,2	340,2	-49,3	111,0	0,3	0,8
9	324,0	-31,9	98,7	291,5	-55,0	97,0	0,2	-1,7
10	280,5	-39,7	88,0	249,1	-57,7	82,6	-0,9	-5,4
11	241,7	-46,1	77,1	212,8	-54,4	70,0	-2,5	-7,1
12	207,7	-49,3	67,2	182,0	-55,3	60,0	-3,2	-7,2

Величини $\delta\delta P$ вказують, що найбільші зміни атмосферного тиску з висотою відбуваються в нижніх шарах тропосфери. У колонках 4 і 7 показані частки сухої складової, отримані інтегруванням в кожному окремому кілометровому шарі. Як видно, закономірність зміни цих часток з висотою повністю корелюють із змінами других різниць атмосферного тиску.

Отримані результати вказують на неможливість точного визначення d_d^z лише за відомим значенням приземного атмосферного тиску P_0 з використанням існуючих аналітичних моделей.

Аналіз величини сухої складової за аналітичними моделями

Для 82 вертикальних профілів атмосфери, побудованих за даними аерологічного зондування на станції Одеса, обчислювались значення сухої складової зенітної тропосферної затримки $d_{d(aerol)}^z$ числовим інтегруванням. Крім цього, визначались величини d_d^z і за аналітичними моделями Саастамойнена, Девіса, Хопфілд71 і Хопфілд72. Надалі обчислювались різниці між значеннями сухих складових, отриманих за

інтегральною формулою та за кожною з цих аналітичних моделей. За цими різницями розраховувались середні квадратичні похибки (СКП) за формулою Гаусса.

У таблиці 3 приведені значення (СКП) для річного, зимового та літнього періодів. Річний період охоплював усі 82 моделі атмосфери, для літнього періоду з них було вибрано 39 моделей, а для зимового – 15 моделей атмосфери. Зазначимо, що при визначенні середніх квадратичних похибок відповідні значення $d_{d(aerol)}^z$, отримані інтегруванням за даними аерологічного зондування, приймалися за істинні.

Таблиця 3

Середні квадратичні похибки сухих складових зенітної тропосферної затримки, визначених за аналітичними моделями

Модель	Річний період	Зимовий період	Літній період
	СКП, мм	СКП, мм	СКП, мм
Saastamoinen	7,7	2,7	10,2
Devis	7,6	2,8	10,0
Hopfield 71	9,9	2,8	13,0
Hopfield 72	12,2	3,6	15,6

Результати табл.3 показують, що середні квадратичні похибки визначення сухої складової d_d^z в зимовий період є меншими приблизно в 4 рази, ніж в літній період.

Оскільки в сучасній літературі найбільше уваги приділяється моделям Саастамойнена і Хопфілд, то ми серед інших моделей надали перевагу саме їм.

Для наочності річний хід різниць $\delta d_d^z(SA) = d_{d(aer)}^z - d_d^z(SA)$ і $\delta d_d^z(HO) = d_{d(aer)}^z - d_d^z(HO)$ зображено на рис.1. Причому, з двох моделей Хопфілд у даному випадку вибрана модель Хопфілд71, оскільки вона дає кращі результати середніх квадратичних похибок, що показано в табл. 3.

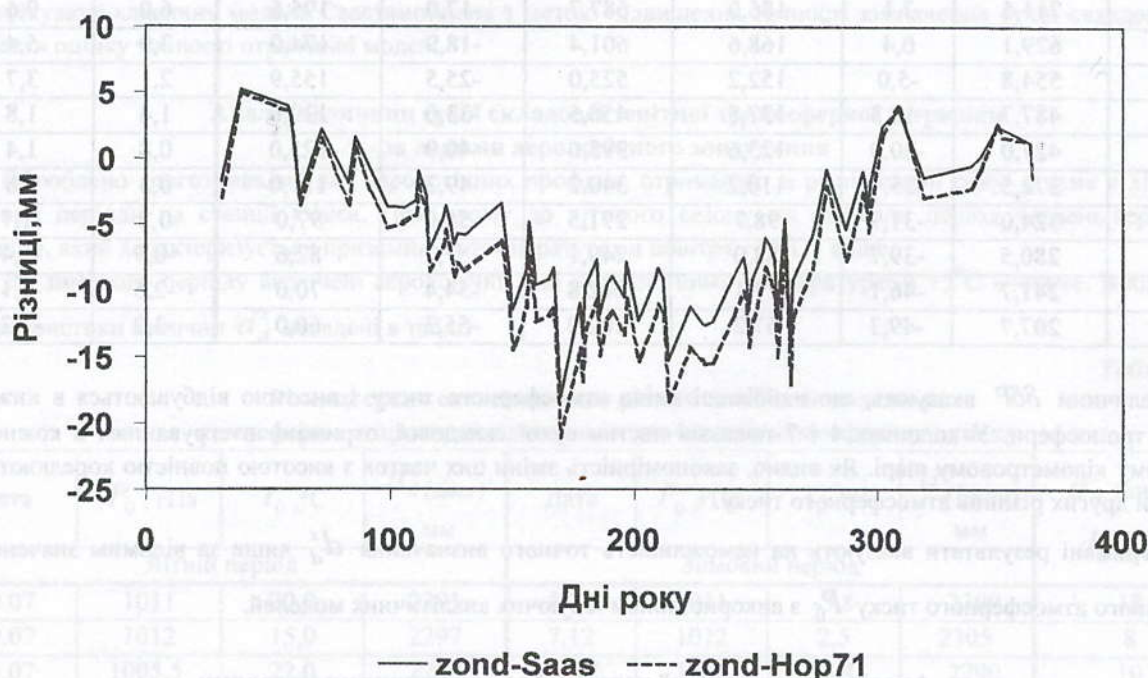


Рис.1. Різниця сухих складових в міліметрах

Як видно з рис.1, різниця $\delta d_d^z(SA)$ і $\delta d_d^z(HO)$ є від'ємними майже протягом всього року за винятком окремих зимових дат. Що стосується величин сухої складової, то різниця між ними є систематичними, причому взимку вони є мінімальними і становлять 1-3 мм, а в літній період 5-10 мм. Причина полягає в тому,

що при створенні моделей Саастамойнена та Хопфілд використано різні підходи щодо представлення вертикальних профілів атмосфери, а саме закон гідростатичної рівноваги та політропна модель атмосфери.

Виходячи з аналізу результатів, слід зазначити, що модель Саастамойнена дає дещо кращі результати для досліджуваного регіону Південно-Західної частини України, ніж інші аналітичні моделі. Разом з тим і модель Саастамойнена не забезпечує точного визначення сухої складової зенітної тропосферної затримки. Тому подальші наші дослідження направлені на модифікацію цієї моделі з метою застосування її для вищевказаного регіону.

Модифікація аналітичних моделей та оцінка точності

За аналогією з підходом Девіса (визначення сухої складової зенітної тропосферної затримки) щодо модифікації формули Саастамойнена зміною постійного коефіцієнта нами зроблено аналогічний підхід, а саме:

- на основі обчислених значень величин $d_{d(aerol)}^z$ і $d_d^z(SA)$ за способом найменших квадратів отримано коефіцієнт формули Саастамойнена, рівний 0,0022684. Із цим коефіцієнтом модифікована формула Саастамойнена записується так:

$$d_d^z(SA) = \frac{0.0022684 \cdot P_0}{(1 - 0.0026 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 H_0)}, \quad (3)$$

- повторно обчислені значення $d_d^z(SA)$ за 39 моделями атмосфери і отримано середню квадратичну похибку $m = 2,5$ мм у порівнянні з величиною $m = 10,2$ мм, яка була отримана за класичною формулою.

Для перевірки наших тверджень було використано додатково 10 моделей атмосфери для літнього періоду, що не були включені в попередні обчислення (табл.4).

Таблиця 4

Оцінка точності визначення сухої складової зенітної тропосферної затримки за модифікованою моделлю Саастамойнена $\delta d_d^z(SA)$

Дата	P_0	t_0	$d_{d(aerol)}^z$	$d_d^z(SA)$ класична	$\delta d_d^z(SA)$	$d_d^z(SA)$ модифік.	$\delta d_d^z(SA)$
1	2	3	4	5	6	7	8
8.06	1011,5	17,1	2295	2303	-8	2294	1
9.06	1012,0	16,6	2299	2304	-5	2295	4
12.06	1015,5	18,3	2305	2312	-7	2303	2
13.06	1013,0	17,5	2299	2306	-7	2298	1
15.06	1010,0	19,5	2293	2299	-6	2291	2
26.06	1012,0	23,0	2295	2304	-9	2295	0
3.07	1014,0	20,4	2302	2309	-7	2300	2
4.07	1012,5	20,6	2295	2305	-10	2296	-1
7.07	1006,5	15,0	2284	2292	-8	2283	1
15.08	1000,5	18,0	2266	2278	-12	2269	-3
m					8,1		2,1

У таблиці 6 в колонках 6 і 8 приведені різниці між величинами $d_{d(aerol)}^z$ і $d_d^z(SA)$, визначеними відповідно за класичною і модифікованою формулами Саастамойнена.

На основі результатів таблиці 4 можна стверджувати, що запропонована нами формула (3) є найбільш репрезентативною для літнього періоду у Південно-Західному регіоні України. Вона дає в 4 рази кращі результати, ніж класична формула Саастамойнена. Стосовно зимового періоду, то нами на відносно недовгому ряді аерологічних зондувань встановлено таку модифіковану формулу Саастамойнена:

$$d_d^z(SA) = \frac{0.0022788 \cdot P_0}{1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00028 H_0}, \quad (4)$$

яка дозволяє отримувати результати в середньому на 20% кращі, ніж за класичною формулою.

Висновки та рекомендації

- встановлено, що в зимовий період значення сухої складової зенітної тропосферної затримки перевищують аналогічні дані для літа на величину 10 мм і більше;
- зроблено оцінку сухої складової зенітної тропосферної затримки, визначеної за різними аналітичними моделями протягом річного періоду;
- розроблено модифіковану формулу Саастамойнена, за якою отримано величину сухої складової зенітної тропосферної затримки для літнього періоду із середньою квадратичною похибкою 2,5 мм, що приблизно в 4 рази точніше, ніж за класичною формулою. Така точність підтверджена і за незалежними 10 моделями атмосфери;
- розроблено модифіковану формулу Саастамойнена для зимового періоду, яка забезпечує підвищення точності визначення сухої складової приблизно на 20% порівняно з класичною формулою;
- для інших регіонів України, зокрема Західного, рекомендується виконати аналогічні дослідження, взявши за основу довготривалі ряди аерологічних зондувань.

1. Mendes V.B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques.// Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report. -University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999. - № 199. -353pp. 2. Mironov N., Linkwitz K., Bahndorf J. Wet Component of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Meteorological Data. - Stuttgart, 1993. - P.17. 3. Прокопов А.В. Методы учета влияния земной атмосферы в космической геодезии и навигации // ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. - 2001. - Т 7. - №4. - С. 163-168. 4. Заблоцький Ф.Д. До вибору моделей визначення складових зенітної тропосферної затримки при геодинамічних дослідженнях // Геодинаміка. - Львів, 2000. -№ 1 (3). - С. 1-7.