

УДК 528.2:629.78

АНАЛІЗ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ В ТИХООКЕАНСЬКИХ ТРОПІЧНИХ ШИРОТАХ

Ф. Заблоцький, О. Заблоцька

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: зенітна тропосферна затримка.**Постановка проблеми**

Однією з найвпливовіших похибок на результати GPS-вимірів є похибка тропосферної затримки. Вона навіть із використанням найпоширеніших аналітичних моделей, може сягати в зенітній зоні декількох десятків міліметрів у середніх широтах і сотні та більше міліметрів в екваторіальній зоні (тропічних широтах).

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються цієї проблеми

Загальний характер тропосферної затримки в екваторіальній зоні викладений в роботі [4]. Окремі результати оцінювання тропосферної затримки в цій зоні висвітлені в публікаціях [5, 6].

Невирішені частини загальної проблеми полягають у тому, що, по-перше, екваторіальна зона недостатньо вивчена з погляду характеру формування тропосферної затримки, по-друге, більшість застосовуваних сьогодні аналітичних моделей, призначених для урахування тропо-

сферної затримки в результаті, насамперед, GPS-вимірів, розроблені понад 30 років тому, коли інструментальна спроможність сягала лише дециметрової точності. Причому такі аналітичні моделі розроблялись переважно на основі глобально усереднених профілів радіозондування на станціях середніх широт Західної Європи та західної півкулі.

Постановка завдання полягає в оцінюванні величин сухого та вологого складників зенітної тропосферної затримки, отриманих за допомогою аналітичних моделей Саастамойнена та Гопфілд.

Виклад основного матеріалу дослідження

Початковими даними слугували вертикальні профілі атмосферного тиску, температури та відносної вологості повітря, отримані за допомогою радіозондувань на п'яти станціях тихоокеанської тропічної зони, основні характеристики яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні фізико-географічні характеристики станцій

Назва станції	Широта ° ' "	Довгота ° ' "	Висота, м	Країна, призначення станції	Місцевий сер. сонячний час у 0 ^h UT
Singapore	1 22 N	103 59 E	16	Сінгапур, міжнародний аеропорт	6 ^h 56 ^m
Koror	7 20 N	134 29E	30	Республіка Палау, міжнародний аеропорт	8 ^h 57 ^m
Guam	13 28 N	144 47 E	75	Ґуам (США), міжнародний аеропорт	9 ^h 40 ^m
Pago Pago	14 20 S	170 43W	75	Східне Самоа (США), міжнародний аеропорт	12 ^h 37 ^m
Hilo	19 43 N	155 03W	10	Гаваї (США), міжнародний аеропорт	13 ^h 40 ^m

За даними радіозондування було складено для всіх станцій 194 моделі атмосфери для періоду з 11 по 20 січня, квітня, липня і жовтня 2008 року на 0 год Всесвітнього часу (0^h UT). Причому у переважній більшості цих моделей зондування вказаних метеорологічних параметрів здійснювалось не менш ніж до ізобаричної поверхні 10 гПа, що відповідає, в середньому, висоті понад 30 км над рівнем моря. Для шарів атмосфери від верхньої границі зондування до 80 км (верхня границя числового інтегрування сухого складника zenітної тропосферної затримки) значення атмосферного тиску та температури повітря вибирали зі стандартної моделі атмосфери СМА-81 [1].

Для кожної моделі атмосфери, тобто за вертикальними профілями метеопараметрів, визначено числовим інтегруванням величину сухого d_d (аер) і вологого d_w (аер) складників zenітної тропосферної затримки. Далі за приземними значеннями тиску P_0 , температури t_0 , відносної вологості повітря U_0 , висоти H_0 та за геогра-

фічною широтою φ обчислені величини сухого d_d (SA) і вологого d_w (SA) складників zenітної тропосферної затримки за аналітичною моделлю Саастамойнена і відповідні величини d_d (НО) та d_w (НО) за моделлю Гопфілд.

У табл. 2 наведені для кожної станції усереднені приземні значення метеопараметрів P_0 , t_0 , U_0 , парціального тиску e_0 (обчисленого за відносною вологістю та температурою повітря), а також величини сухого d_d (аер) і вологого d_w (аер) складників zenітної тропосферної затримки й різниці δd_d (SA), δd_d (НО), δd_w (SA), δd_w (НО) між відповідними складниками zenітної тропосферної затримки, обчисленими за даними радіозондування та за аналітичними моделями (верхній рядок); середні квадратичні похибки, обчислені за формулою Гаусса (середній рядок) та середні квадратичні відхилення (нижній рядок), а також усереднені по всіх станціях указані величини.

Таблиця 2

Усереднені приземні метеорологічні параметри; сухий і вологий складники zenітної тропосферної затримки та різниці між ними та відповідними складниками, отриманими за формулами Саастамойнена і Гопфілд, а також середні квадратичні похибки та середні квадратичні відхилення, мм

Характеристики	P_0	t_0	U_0	e_0	d_d аер	δd_d SA	δd_d НО	d_w аер	δd_w SA	δd_w НО
ст. Singapore										
середнє	1007,5	25,78	83,5	27,70	2280,0	-20,1	-20,1	337,2	69,4	89,0
сер. кв. похиб.						20,1	20,1		73,3	91,8
сер. кв. відхил.	0,8	0,48	4,5	1,29	1,8	1,2	1,2	14,8	20,5	19,6
ст. Koror										
середнє	1006	28,01	81,7	30,81	2276,6	-19,6	-20,2	317,2	21,4	50,6
сер. кв. похиб.						19,6	20,3		46,2	63,3
сер. кв. відхил.	0,7	1,22	6,4	1,29	2,2	1,6	1,5	32,3	31,6	29,5
ст. Guam										
середнє	1003,0	28,06	79,2	30,01	2271,0	-18,1	-19,1	301,5	13,3	41,8
сер. кв. похиб.						18,2	19,1		30,3	49,4
сер. кв. відхил.	0,8	0,92	5,4	1,01	2,4	1,5	1,4	27,5	26,9	25,6
ст. Pago Pago										
середнє	1010,5	28,78	78,8	30,7	2289,9	-16,4	-17,3	296	1,9	33,4
сер. кв. похиб.						16,5	17,4		49,1	56,6
сер. кв. відхил.	1,2	1,11	6,6	1,7	4,2	2,3	2,2	45,9	40,3	39,6
ст. Hilo										
середнє	1014,9	25,81	62,8	20,8	2302,4	-13,1	-14,4	194,7	-6,7	8,3
сер. кв. похиб.						13,2	14,5		22,8	21,8
сер. кв. відхил.	1,3	1,61	8,8	1,56	3,5	1,4	1,5	28,7	21,5	20,6
Середнє по всіх станціях										
середнє	1008,4	27,29	77,2	28,00	2284,0	-17,5	-18,2	289,3	19,9	44,6
сер. кв. похиб.						17,5	18,3		44,3	56,6
сер. кв. відхил.	1,0	1,07	6,3	1,37	2,8	1,6	1,6	29,8	28,2	27,0

На підставі даних табл. 2 зазначимо:

– повна величина зенітної тропосферної затримки (сухий плюс вологий складники) близька в середньому до 2600 мм, а на станції Singapore навіть перевищує цю величину. Такі максимальні величини не спостерігаються ні в середніх, а тим паче у високих широтах. Це відбувається за рахунок зростання вологого складника внаслідок значної кількості водяної пари в тропосфері, а особливо в нижніх її шарах;

– у всіх випадках різниці сухого складника зенітної тропосферної затримки δd_d (SA) і δd_d (HO) є від’ємними і становлять у середньому – 18 мм. Це вказує на необхідність детального аналізу формул визначення сухого складника як за моделлю Саастамойнена, так і за моделлю Гопфілд.

Різниці між вологим складником, визначеним за даними радіозондування, й моделями Саастамойнена та Гопфілд загалом є додатними, причому величини δd_w HO є більшими від відповідних величин δd_w SA на 25 мм. Це пов’язано з тим, що висота тропосфери, покладена в основу визначення вологого складника за моделлю Гопфілд, не відповідає середній реальній висоті тропосфери, характерній для тропічних широт.

У табл. 3 наведені екстремальні значення приземних метеорологічних параметрів, сухого і вологого складників зенітної тропосферної затримки та різниць між ними й відповідними величинами за моделями Саастамойнена та Гопфілд за досліджуваний період.

Таблиця 3

**Екстремальні значення приземних метеорологічних параметрів,
сухого і вологого складників зенітної тропосферної затримки та різниць
між ними й відповідними величинами за моделями Саастамойнена та Гопфілд**

Значення	P_0	t_0	U_0	e_0	$d_{d,aer}$	$d_{w,aer}$	$\delta d_d SA$	$\delta d_d HO$	$\delta d_w SA$	$\delta d_w HO$
ст. Singapore										
мінімальне	1005	24,4	62	24,6	2274	287	-15	-15	-9	15
максимальне	1009	27,0	93	30,2	2284	381	-23	-23	148	166
ст. Kogor										
мінімальне	1005	24,6	70	27,1	2271	221	-13	-14	-72	-42
максимальне	1009	30,0	96	33,3	2281	376	-23	-24	88	115
ст. Guam										
мінімальне	1002	25,6	66	25,5	2266	254	-14	-14	-47	-18
максимальне	1005	29,4	91	32,0	2275	370	-21	-22	79	108
ст. Pago Pago										
мінімальне	1004	26,4	62	27,5	2275	219	-11	-12	-93	-64
максимальне	1016	31,6	95	34,0	2302	388	-21	-22	90	122
ст. Hilo										
мінімальне	1012	20,0	47	14,0	2295	137	-9	-10	-52	-37
максимальне	1018	29,4	87	24,2	2309	260	-16	-18	55	67

Зазначимо, що:

– найбільший розмах екстремальних значень як приземних метеорологічних параметрів, так і складників зенітної тропосферної затримки та їхніх різниць, обчислених за даними радіозондування та за формулами Саастамойнена та Гопфілд припадають на станцію Pago Pago. Мінімальне значення вологого складника d_w (aer) спостерігається на станції Hilo як за окремими вибірками (табл. 3), так і за всіма усередненими значеннями (табл. 2). Зазначимо також, що станції Pago Pago та Hilo мають особливе фізико-географічне розміщення: вони розташовані на узбережжях порівняно невеликих островів, значно віддалених від материків. Особливо це стосується станції Hilo, оскільки

це єдина станція, яка розміщена в центральній частині Тихого океану, а тут і вміст водяної пари, а також її розподіл з висотою у нижній тропосфері значно відрізняється від інших станцій (див. табл. 4 і 5).

Далі для кожної моделі атмосфери визначено числовим інтегруванням частку вологого складника d_w зенітної тропосферної затримки, що формується такими шарами атмосфери: “рівень станції – 850 гПа”, “850–700 гПа”, “700–500 гПа”, “500–300 гПа”, “300–100 гПа”, “100 гПа” – верхня границя зондування відносної вологості” (табл. 4–6). Зауважимо, що в екваторіальній зоні стандартна ізобарична поверхня (100 гПа) відповідає приблизно верхній границі тропосфери.

Таблиця 4

Усереднені частки вологого складника zenітної тропосферної затримки d_w , мм і d_w , % у шарах атмосфери між стандартними ізобаричними поверхнями на станціях (січень, 0^h UT)

Границі поверхонь, гПа	Singapore		Koror		Guam		Pago Pago		Hilo	
	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %
Земля – 850	145,4	46	147,8	45	142,9	51	146,5	43	101,3	57
850–700	90,7	29	89,5	27	78,7	28	90,7	26	46,2	26
700–500	64,4	20	70,2	21	41,6	15	78,5	23	21,0	11
500–300	15,1	5	22,9	7	12,8	5	28,1	8	8,6	5
300–100	1,0	0	1,8	1	1,6	1	2,2	1	0,9	1
100 – в. гр. U	0,1	0	0,2	0	1,5	1	0,6	0	0,7	0
Сума	316,6	100	331,4	100	279,2	100	346,6	100	178,8	100

Таблиця 5

Усереднені частки вологого складника zenітної тропосферної затримки d_w , мм і d_w , % у шарах атмосфери між стандартними ізобаричними поверхнями на станціях (липень, 0^h UT)

Границі поверхонь, гПа	Singapore		Koror		Guam		Pago Pago		Hilo	
	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %	d_w , мм	d_w , %
Земля – 850	147,1	42	142,9	43	151,0	48	145,7	56	123,2	61
850–700	98,9	28	87,0	26	90,4	29	80,4	30	58,6	28
700–500	80,4	23	74,2	22	54,6	18	31,9	11	15,8	8
500–300	23,5	7	24,3	7	13,8	4	7,0	2	4,9	2
300–100	1,8	1	1,7	1	1,1	0	0,9	0	0,6	0
100 – в. гр. U	0,1	0	0,3	0	0,7	0	1,8	1	1,1	1
Сума	351,8	100	330,4	100	311,5	100	267,7	100	204,3	100

Аналізуючи дані табл. 4 і 5, зауважимо, що зондування, виконані в 0 год. Всесвітнього часу, відповідають на станціях Singapore, Koror і Guam ранішнім, а на станціях Pago Pago і Hilo – близьким до полудня годинам місцевого середнього сонячного часу (табл. 1). Це є однією із причин, що в період близько полудня поверхня води (океану) отримує максимум сонячної радіації, що зумовлює значний вплив температури водної поверхні на формування температури повітря в нижніх шарах тропосфери і, відповідно, на розподіл водяної пари в цих шарах.

У табл. 6 подано усереднені частки вологого складника zenітної тропосферної затримки d_w , мм і d_w , % у шарах атмосфери між стандартними ізобаричними поверхнями тропосфери за 11–20 січня та липня на всіх п’яти станціях. Ці дані можуть слугувати певною підставою під час розроблення модифікованих моделей Саастамойнена та Гопфілд з метою точнішого ураху-

вання тропосферної затримки у GPS-виміри в тропічних тихоокеанських широтах.

Розглядаючи дані табл. 4–6, проаналізуємо відсотковий внесок окремих шарів тропосфери, обмежених вказаними ізобаричними поверхнями та оцінимо найвагоміші шари тропосфери, що формують основну частку вологого складника zenітної тропосферної затримки.

Як видно, понад 75 % величини вологого складника d_w вносять два нижні шари тропосфери “рівень станції – 850 гПа” і “850–700 гПа”. Наступний шар “700 – 500 гПа” додає ще майже 20 %. Отже, три нижні шари тропосфери включно до ізобари 500 гПа вносять близько 95 % вологого складника від його загальної величини d_w (аер). Спостерігається також тісна кореляція між розподілом вологого складника d_w і парціальним тиском e у відповідних шарах атмосфери.

Усереднені частки вологого складника zenітної тропосферної затримки d_w , мм (чисельник) і d_w , % (знаменник) у шарах атмосфери між стандартними ізобаричними поверхнями (середнє з п'яти станцій за січень і липень, 0^h UT)

дати грани ці шарів	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	сер.
Земля – 850	$\frac{137,0}{47}$	$\frac{141,9}{49}$	$\frac{139,1}{49}$	$\frac{138,2}{49}$	$\frac{140,0}{49}$	$\frac{137,4}{49}$	$\frac{138,4}{49}$	$\frac{136,9}{49}$	$\frac{140,4}{49}$	$\frac{138,1}{49}$	$\frac{138,7}{49}$
850–700	$\frac{77,1}{26}$	$\frac{80,9}{27}$	$\frac{79,9}{27}$	$\frac{72,1}{27}$	$\frac{77,9}{27}$	$\frac{78,8}{27}$	$\frac{85,1}{27}$	$\frac{82,9}{27}$	$\frac{85,1}{27}$	$\frac{85,1}{27}$	$\frac{80,5}{27}$
700–500	$\frac{58,0}{20}$	$\frac{53,4}{19}$	$\frac{50,9}{19}$	$\frac{48,9}{19}$	$\frac{55,6}{19}$	$\frac{55,1}{19}$	$\frac{54,3}{19}$	$\frac{51,9}{19}$	$\frac{56,2}{19}$	$\frac{56,2}{19}$	$\frac{54,0}{19}$
500–300	$\frac{17,6}{6}$	$\frac{20,6}{5}$	$\frac{15,0}{5}$	$\frac{14,2}{5}$	$\frac{16,0}{5}$	$\frac{14,3}{5}$	$\frac{15,8}{5}$	$\frac{14,4}{5}$	$\frac{16,9}{5}$	$\frac{16,5}{5}$	$\frac{16,1}{5}$
300–100	$\frac{1,5}{1}$	$\frac{1,5}{0}$	$\frac{1,3}{0}$	$\frac{1,3}{0}$	$\frac{1,5}{0}$	$\frac{1,2}{0}$	$\frac{1,3}{0}$	$\frac{1,1}{0}$	$\frac{1,3}{0}$	$\frac{1,5}{0}$	$\frac{1,3}{0}$
100 – в. гр. вологості	$\frac{0,6}{0}$	$\frac{0,5}{0}$	$\frac{0,9}{0}$	$\frac{0,6}{0}$	$\frac{1,2}{0}$	$\frac{0,6}{0}$	$\frac{0,6}{0}$	$\frac{0,5}{0}$	$\frac{0,6}{0}$	$\frac{0,4}{0}$	$\frac{0,6}{0}$
Сума	$\frac{291,7}{100}$	$\frac{298,8}{100}$	$\frac{287,2}{100}$	$\frac{275,2}{100}$	$\frac{292,2}{100}$	$\frac{287,4}{100}$	$\frac{295,4}{100}$	$\frac{287,7}{100}$	$\frac{300,3}{100}$	$\frac{297,7}{100}$	$\frac{291,4}{100}$

Якщо аналізувати за даними окремих станцій, то:

– за сумарною величиною вологого складника d_w zenітної тропосферної затримки максимальна величина припадає на станцію Singapore, де вона становить 327 мм. Мінімальна величина (210 мм) спостерігається на станції Nilo;

– така розбіжність зумовлена різним характером розподілу вологості повітря по висоті у профілях радіозондувань. Так, середній парціальний тиск водяної пари у всіх зазначених шарах атмосфери на станції Singapore є приблизно у 2÷2,5 раза більшим, ніж у відповідних шарах на станції Nilo.

Висновки

На основі виконаних досліджень вважаємо за доцільне зауважити таке:

– повна zenітна тропосферна затримка, на відміну від високих і середніх широт, сягає у тихоокеанських тропічних широтах значно більшої величини, особливо за рахунок вологого складника;

– за результатами аналізу моделей Саастамойнена та Гопфілд, рекомендованих для визначення zenітної тропосферної затримки, у всіх випадках різниці сухого складника δd_d (SA) і δd_d (HO) є від'ємними і становлять у середньому – 20 мм, що не є характерним ні для високих, ні для середніх широт;

– різниці між вологим складником, визначені за даними радіозондування й моделями Саастамойнена та Гопфілд, здебільшого випадків є додатними, причому величини δd_w (HO) є більшими від відповідних величин δd_w (SA) в середньому на 25 мм;

– між станціями екваторіальної зони характерна значна відмінність у середньому значенні величини zenітної тропосферної затримки, яка за даними радіозондування може сягати 100 і більше міліметрів.

Доцільно, на нашу думку, проаналізувати для досліджуваного регіону емпіричні коефіцієнти в моделях Саастамойнена та Гопфілд з метою їх модифікації у зв'язку з особливостями вертикального розподілу температури та вологості повітря в моделі Саастамойнена та невідповідності висот сухої та вологої атмосфери в моделі Гопфілд.

Література

- ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1981.-108 с.
- Заблоцький Ф.Д. Визначення і оцінка складових тропосферної затримки у GPS вимірах // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2001. – Вип. 61. – С. 11–23.
- Заблоцький Ф. Особливості формування вологої складової тропосферної затримки в різних регіонах // 36. наукових праць “Сучасні до-

сягнення геодезичної науки та виробництва”. – Львів: Ліга-прес, 2002. – С. 121–127.

1. Заблоцький Ф.Д., Заблоцька О.Ф. Про характер тропосферної затримки в екваторіальній зоні // Вісник геодезії та картографії. – № 6. – 2009.

2. Mendes V.B., Langley R.B. A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modelling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data // Paper presented at KIS94, International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, August 30 – September 2, 1994, 12 pp.

3. Mendes V.B. Modelling 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, 353 pp.

Аналіз зенітної тропосферної затримки у тихоокеанських тропічних широтах
Ф. Заблоцький, О. Заблоцька

За даними радіозондування на п'ятьох станціях тихоокеанської екваторіальної зони визначені величини сухої й вологої складової зенітної тропосферної затримки числовим інтегруванням, а також за аналітичними моделями Саастамойнена і Хопфілда.

Проаналізовано отримані результати і дано рекомендації з метою подальшого удосконалення наведених досліджень.

Анализ зенитной тропосферной задержки в тихоокеанских тропических широтах
Ф. Заблоцкий, А. Заблоская

По данным радиозондирования на пяти станциях тихоокеанской экваториальной зоны определены величины сухой и влажной составляющих зенитной тропосферной задержки численным интегрированием, а также по аналитическим моделям Саастамойнена и Хопфилда. Проанализированы полученные результаты и даны рекомендации с целью дальнейшего усовершенствования приведенных исследований.

An analysis of zenith tropospheric delay in the Pacific tropical latitudes
F. Zablotzkyj, A. Zablotska

There are shown the values of dry and wet components of zenith tropospheric delay obtained by an integration of the radiosonde data at five stations of the Pacific tropical latitudes. These components were determined and estimated by means of *Saastamoinen* and *Hopfield* analytical models as well. The recommendations regarding further development of such investigations are made.



**Видавництво Львівської політехніки
пропонує**

**Заблоцький Ф. Д., Заблоцька О. Ф.
АНГЛІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКИЙ ГЕОДЕЗИЧНИЙ
СЛОВНИК**

За ред. Б. Є. Рицара. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010.
(Термінографічна серія СловоСвіт. № 14). 360 с.
Формат 145 x 215 мм. Тверда оправа.
ISBN 978-966-553-864-6

Словник містить понад 20 000 слів і словосполучень з геодезії, фотограмметрії, картографії, вищої геодезії, геодезичної астрономії, гравіметрії, супутникової та космічної геодезії. Подано також найуживаніші терміни й вирази з кадастру, навігації, метеорології, геології та інших суміжних з геодезією наук. Видання доповнено українсько-англійським абетковим покажчиком.

Словник розраховано на широке коло користувачів: студентів, аспірантів, наукових працівників і фахівців геодезичного профілю.

Видання рекомендував Технічний комітет стандартизації науково-технічної термінології Держспоживстандарту та Міністерства освіти і науки України.

Книги можна замовити за адресою: вул. Ф. Колесси, 2, корп. 23А, м. Львів, 79000
тел. +38 032 258-21-46, факс +38 032 258-21-36, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua, <http://vlp.com.ua>