



## АНАЛІЗ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ СИГНАЛУ В ЕКВАТОРІАЛЬНІЙ ЗОНІ ЗА МАТЕРІАЛАМИ РАДІОЗОНДУВАННЯ

По данным радиозондирования на шести станциях экваториальной зоны определены величины сухой и влажной составляющих зенитной тропосферной задержки сигналов численным интегрированием, а также по аналитическим моделям Саастамойнена и Хопфилд. Проанализированы полученные результаты и даны рекомендации по дальнейшему усовершенствованию методики исследований.

The values of dry and wet components of zenith tropospheric delay have been obtained by an integration of the radiosonde data from 6 stations in the equatorial zone. These components have been determined and estimated by means of Saastamoinen and Hopfield analytical models as well. The recommendations regarding further development of such investigations are made.

**Постановка проблеми.** Однією з найхарактерніших помилок під час GPS-вимірювань є помилки, пов'язані з тропосферною затримкою сигналів. Величина похибок вимірів, навіть із використанням найпоширеніших аналітичних моделей, може сягати вже в зенітній зоні кількох десятків міліметрів у середніх широтах і сотні та більше міліметрів у екваторіальній зоні (тропічних широтах).

**Аналіз останніх публікацій з даної проблеми.** Пріоритет у дослідженні питань впливу явища тропосферної затримки на GPS-вимірювання в екваторіальній зоні належить науковцям геодезичної лабораторії Університету провінції Нью-Брансвік (Канада). Результати цих досліджень висвітлені в публікаціях [5,6] та ін.

**Невирішені частини загальної проблеми** полягають у тому, що, по-перше, екваторіальна зона недостатньо вивчена з точки зору характеру формування тропосферної затримки, по-друге, більшість відомих і широковикористовуваних на сьогоднішній день аналітичних моделей, призначених для випадків врахування тропосферної затримки в результаті насамперед GPS-вимірів, розроблені понад 30 років тому, коли інструментальна спроможність сягала лише дециметрової точності. До того ж, такі аналітичні моделі розроблялись переважно на базі максимально усереднених профілів радіозондування або прийнятих на їх основі стандартних атмосфер для середніх широт Західної півкулі.

**Постановка завдання:** оцінити найбільший вплив шарів нижньої атмосфери тропічних широт на величину сухого та вологого складників зенітної тропосферної затримки; проаналізувати точність найбільш застосовуваних для цього аналітичних моделей Саастамойнена і Гопфилд.

**Основний зміст дослідження.** За вихідні дані ми взяли результати радіозондування на шістьох станціях, основні з яких зведено в табл. 1.

За результатами радіозондування для всіх станцій було складено 42 моделі атмосфери для трьох дат січня та чотирьох липня 2008 р. на 0 год Всесвітнього часу (0<sup>h</sup> UT). Причому моделі атмосфери вибирались лише для дат, коли зондування ат-

Таблиця 1. Основні фізико-географічні характеристики станцій

Назва	Широта	Довгота	Висота, м	Місце розташування
Guam	13°28' N	144°47' E	75	о. Гуам (США), міжнародний аеропорт
Seychelles	4°41' S	55°31' E	4	о. Мае (Республіка Сейшели), міжнародний аеропорт
Singapore	1°22' N	103°59' E	16	о. Сінгапур (Сінгапур), міжнародний аеропорт
Pago Pago	14°20' S	170°43' W	75	о. Тутуїла (Східне Самоа; США), міжнародний аеропорт
Hilo	19°43' N	155°03' W	10	о. Гаваї (Гаваї; США), міжнародний аеропорт
Koror	7°20' N	134°29' E	30	о. Бабелдаоб (Республіка Палау), міжнародний аеропорт

мосферного тиску, температури та відносної вологості повітря проводились не менш ніж до ізобаричної поверхні 10 гПа, що в середньому відповідає висоті понад 30 км над рівнем моря. Виняток становить лише станція *Seychelles*, де відносна вологість вимірювалась в середньому до показника 300 гПа, тобто до 10 км над рівнем моря. Для шарів атмосфери від верхньої межі зондування до 80 км (верхня межа числового інтегрування) значення атмосферного тиску і температури повітря вибирались зі стандартної моделі атмосфери СМА-81 [1].

У результаті радіозондування встановлено середню висоту і температуру повітря на верхній межі тропосфери, які становлять для січня та липня відповідно 17,6 км і -83,7 °С та 16,89 км і -81,9 °С. Як бачимо, висота тропосфери в січні дещо вища, ніж у липні, а температура повітря дещо нижча. Така закономірність спостерігається на всіх станціях. За довгими рядами радіозондувань, що охоплюють по 10 дат січня та липня для кожної станції, ці величини становлять відповідно 17,2 км і -82,9 °С та 16,3 км і -77,7 °С.

© Ф. Д. Заблоцький, О. Ф. Заблоцька, 2009



Для кожної моделі атмосфери числовим інтегруванням визначено величину сухого  $d_{даер}$  і вологого  $d_{ваер}$  складників zenітної тропосферної затримки. Далі за приземними значеннями тиску  $P_0$ , температури  $t_0$ , відносної вологості повітря  $U_0$ , висоти  $H_0$  та географічною широтою  $\varphi$  обчислено величини сухого  $d_{dSA}$  і вологого  $d_{wSA}$  складників zenітної тропосферної затримки за аналітичною моделлю Саастамойнена і відповідні величини  $d_{dHO}$  і  $d_{wHO}$  за моделлю Гопфілд.

У табл. 2 наводяться усереднені окремо для кожної станції, а також по всіх станціях приземні значення метеопараметрів  $P_0$ ,  $t_0$ ,  $U_0$ , висоти верхньої межі тропосфери  $H_{троп}$ , температури її повітря  $t_{троп}$ , сухого  $d_{даер}$  і вологого  $d_{ваер}$  складників zenітної тропосферної затримки й усереднені різниці  $\delta d_{dSA}$ ,  $\delta d_{dHO}$ ,  $\delta d_{wSA}$ ,  $\delta d_{wHO}$  між відповідними складниками zenітної тропосферної затримки, обчисленими за даними радіозондування та за аналітичними моделями.

**Таблиця 2. Усереднені приземні метеорологічні параметри, висота і температура верхньої межі тропосфери та сухий і вологий складники zenітної тропосферної затримки (мм)**

$P_0$	$t_0$	$U_0$	$H_{троп}$	$t_{троп}$	$d_{даер}$	$\delta d_{dSA}$	$\delta d_{dHO}$	$d_{ваер}$	$\delta d_{wSA}$	$\delta d_{wHO}$
ст. Guam										
1003,7	27,5	81,9	16,73	-84,03	2272	-18	-19	310	21	48
ст. Seychelles										
1010,1	25,4	85,1	16,92	-83,56	2279	-27	-27	284	16	34
ст. Singapore										
1009,0	25,7	81,9	17,03	-84,39	2273	-21	-21	327	66	85
ст. Pago Pago										
1011,0	29,1	78,4	16,94	-81,67	2291	-16	-17	286	-16	17
ст. Hilo										
1015,9	25,1	71,7	17,34	-75,53	2304	-14	-15	210	-11	4
ст. Koror										
1006,3	28,1	49,3	17,07	-85,56	2278	-19	-19	325	36	65
Середнє по всіх станціях										
1009,3	26,8	79,7	17,00	-82,66	2284	-19	-20	290	19	42

На підставі даних табл. 2 можемо зазначити таке:  
 - верхня межа тропосфери в екваторіальній зоні пролягає набагато вище, ніж у високих і середніх широтах, а температура повітря на цій межі значно нижча;

- сухий складник zenітної тропосферної затримки в середньому близький до величини 2300 мм, а вологий – до 300 мм;

- різниці сухого складника zenітної тропосферної затримки  $\delta d_{dSA}$  і  $\delta d_{dHO}$  від'ємні й становлять у середньому -20 мм. Це вказує на необхідність детального аналізу визначення сухого складника як за моделлю Саастамойнена, так і за моделлю Гопфілд;

- різниці між вологим складником, визначені за даними радіозондування й моделями Саастамойнена та Гопфілд, загалом додатні, причому величини  $\delta d_{wHO}$  більші за відповідні величини  $\delta d_{wSA}$  на 20-30 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.

Потім для кожної моделі атмосфери числовим інтегруванням було визначено частку вологого складника  $d_w$  zenітної тропосферної затримки, що формується в різних шарах атмосфери: "рівень станції – 850 гПа", "850-700 гПа", "700-500 гПа", "500-300 гПа", "300-100 гПа", "100 гПа – верхня межа зондування відносної вологості" (табл. 3). Зауважимо, що в екваторіальній зоні стандартна ізобарична поверхня (100 гПа) відповідає приблизно верхній межі тропосфери.

Використовуючи дані табл. 3, проаналізуємо внесок окремих шарів тропосфери, обмежених вказаними ізобаричними поверхнями, та визначимо найвагомійші серед них, що формують основну частку вологого складника zenітної тропосферної затримки.

Як видно з табл. 3, близько 80 % величини вологого складника  $d_w$  дають два нижніх шари тропосфери – "рівень станції – 850 гПа" і "851-700 гПа". Наступний шар (701-500 гПа) додає ще майже 16 %. Отже, три нижні шари тропосфери включно до ізобари 500 гПа формують майже 95 % вологого складника від його загальної величини  $d_{ваер}$ . Спостерігається також відносна кореляція між розподілом вологого складника  $d_w$  і парціальним тиском  $e$  у відповідних шарах атмосфери.

Якщо проаналізувати дані по окремих станціях, то тут картина така: 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) характерна для станції Hilo. Така розбіжність зумовлена різним характером розподілу вологості повітря по висоті у профілях радіозондувань. Так, середній парціальний тиск водяної пари у всіх шарах атмосфери на станції Singapore приблизно у 2-2,5 раза більший, ніж у відповідних шарах на станції Hilo.

**Таблиця 3. Усереднені значення вологого складника zenітної тропосферної затримки ( $d_w$ , мм /  $d_w$ , %) у шарах атмосфери між стандартними ізобаричними поверхнями**

Межі поверхонь, гПа	Станція						Середнє значення
	Guam	Seychelles	Singapore	Pago Pago	Hilo	Koror	
Рівень станції – 850	147,1/50	141,7/51	151,4/47	148,6/54	125,5/60	149,9/48	144,0/51,5
851-700	85,1/27	82,4/27	96,6/30	73,4/26	55,7/26	87,3/27	80,1/27,1
701-500	57,4/18	52,7/17	56,3/17	48,3/16	19,9/9	64,8/19	49,9/15,9
501-300	17,7/5	10,6/4	21,2/7	14,4/5	6,8/3	21,1/6	15,3/5,0
301-100	1,6/1	0,8/0	1,2/0	0,8/0	0,8/0	1,2/0	1,1/0,4
100 – в. межа	0,8/0	0/0	0,1/0	0/0	1,1/1	0,4/0	0,4/0,2
<b>Сума</b>	<b>309,6/100</b>	<b>288,2/100</b>	<b>326,8/100</b>	<b>285,7/100</b>	<b>209,7/100</b>	<b>324,8/100</b>	<b>290,8/100</b>



**Висновки та рекомендації.** На підставі виконаних досліджень вважаємо за доцільне зробити такі висновки:

- зенітна тропосферна затримка в екваторіальній зоні значно більша, ніж у високих і середніх широтах, особливо за рахунок вологого складника;
- як показують результати аналізу моделей Саастамойнена та Гопфілд, рекомендованих для визначення зенітної тропосферної затримки, у всіх випадках різниці сухого складника  $\delta d_{dSA}$  і  $\delta d_{dHO}$  від'ємні й становлять у середньому -20 мм, що не характерно ні для високих, ні для середніх широт;
- різниці між вологим складником, визначені за даними радіозондування і моделями Саастамойнена та Гопфілд, загалом додатні, причому величини  $\delta d_{wHO}$  більші за відповідні величини  $\delta d_{wSA}$  на 20-30 мм;
- між станціями екваторіальної зони існує значна відмінність у середньому значенні величини зенітної тропосферної затримки, яка за даними радіозондування може сягати 100 і більше міліметрів.

На нашу думку, в перспективі доцільно провести подібний аналіз за даними значно довшого ряду радіозондувань в екваторіальній зоні з метою модифікації вказаних аналітичних моделей заміною емпіричних коефіцієнтів у формулах Саастамойнена та висот тропосфери у формулах Гопфілд.

#### Література

1. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 108 с.

2. *Заблоцький Ф.* Моделі атмосфери для визначення тропосферної затримки в полярних регіонах: Зб. наук. пр. «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва». – Л.: Вид-во «Ліга-Прес», 2001. – С. 37-42.

3. *Заблоцький Ф.* Особливості формування вологої складової тропосферної затримки в різних регіонах: Зб. наук. пр. «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва». – Л.: Вид-во «Ліга-Прес», 2002. – С. 121-127.

4. *Заблоцький Ф., Паляниця Б.* Вертикальний розподіл вологої складової тропосферної затримки у літній період: Зб. наук. пр. «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва». – Л.: Вид-во «Ліга-Прес», 2003. – С. 155-158.

5. *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 p.

6. *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 p.

#### Інтернет-джерело

7. *Zablotskyj F.D.* On determination precision of tropospheric delay at the Antarctic coast stations // Proceedings of the Third Antarctic Geodesy Symposium, 17-21 July, 2001, Saint Petersburg. – <http://www.scar-ggi.org.au/geodesy/ags01/zablotskyj.pdf>

Надійшла 13.10.09

\* \* \*

УДК 528.14/16

П. Д. Дзуліт, О. В. Кучер

## ОСНОВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ДЕРЖАВНОЇ ГРАВИМЕТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ УКРАЇНИ

*Рассматриваются вопросы создания и модернизации Государственной гравиметрической сети Украины, ее интеграции в европейскую и мировую гравиметрические сети, построения модели квазигеоида на территорию страны, значение гравиметрических измерений для решения важных государственных научных и хозяйственных задач, создания современных геодинамических полигонов, а также проблемы метрологического обеспечения измерений.*

*Considered in the paper are the issues of creation and modernization of State Gravity Network of Ukraine, its integration into European and World Gravity Networks, construction of quasi-geoid model for the territory of Ukraine. It is pointed out the role of gravity measurements for solving important state scientific and economic problems, creating of improved geodynamic grounds, as well as the problem of metrological assurance of measurements.*

**Вступ.** В останні десятиріччя впроваджено таку апаратуру й методи координатних визначень засобами глобальних навігаційних супутникових систем (GPS і ГЛОНАСС), які дають змогу одразу одержувати геодезичні координати: широту, довго-

ту і висоту. Нормальні висоти пунктів визначають у процесі високоточного геометричного нівелювання і гравіметричних вимірювань уздовж нівелірного ходу. Висоти квазигеоїда (аномалії висот), які являють собою різниці між геодезичною і нормальною висотами, розраховують, як правило, за даними супутникових геодезичних спостережень,

© П. Д. Дзуліт, О. В. Кучер, 2009