

УДК 528.2:629.78

Заблоцький Ф.Д.

НУ “Львівська політехніка”, кафедра вищої геодезії та астрономії

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ У GPS ВИМІРАХ

© Заблоцький Ф.Д., 2000

На основании данных аэрологического зондирования в трех основных регионах Антарктиды и в юго-западной части Украины выполнен анализ определения как сухой (гидростатической), так и влажной (негидростатической) составляющих зенитной тропосферной задержки. Эти составляющие были определены также по некоторым известным аналитическим моделям и выполнена их оценка. Высказаны рекомендации относительно дальнейшего развития таких исследований.

The analysis of the determination of both dry (hydrostatic) and wet (non-hydrostatic) components of zenith tropospheric delay is performed on the ground of aerological sounding data in three major regions of Antarctica and in South-West part of Ukraine. These components were determined and estimated for some known analytical models as well. The recommendations regarding further development of such investigations are made.

Для обчислення тропосферної затримки радіохвиль використовують формулу індексу показника заломлення повітря

$$N = K_1 \frac{P_d}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (1)$$

де $P_d = P - e$ – атмосферний тиск сухого повітря; e – парціальний тиск водяної пари; T – абсолютна температура повітря; K_1, K_2, K_3 – емпіричні коефіцієнти. Перший член формулі (1) практично не залежить від вмісту водяної пари в атмосфері і тому його називають сухою складовою, а суму другого і третього членів – вологовою складовою індексу показника заломлення повітря. Для переходу до неідеального газу Owens запропонував коефіцієнти стискування, які були зведені Thayer до вигляду:

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \left[57.9 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{0.52}{T} \right) - 9.4611 \cdot 10^{-4} \frac{t}{T^2} \right], \quad (2)$$

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \cdot \left(\frac{e}{T^3} \right) \cdot \left(1 - 0.01317 \cdot t + 1.75 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 1.44 \cdot 10^{-6} t^3 \right), \quad (3)$$

де Z_d^{-1} , Z_w^{-1} – величини, обернені коефіцієнтам стискування сухого повітря і водяної пари; t – температура повітря за шкалою Цельсія. Отже, для неідеального газу формула (1) набирає вигляду

$$N = K_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + \left(K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_w^{-1}. \quad (4)$$

В роботі [3] було запропоновано, використовуючи рівняння стану для вологого повітря, формулу індексу показника заломлення повітря подати у такому вигляді

$$N = K_1 \cdot R_d \cdot \rho + \left(K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_w^{-1}, \quad (5)$$

де $R_d = 287,06 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ – питома газова стала сухого повітря; ρ – загальна густина повітря;

$$K'_2 = K_2 - K_1 \frac{R_d}{R_w} = K_2 - K_1 \frac{M_w}{M_d},$$

де $R_w = 461,525 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ – питома газова стала водяної пари; M_w, M_d – відповідно, молекулярні маси водяної пари і сухого повітря. У формулі (5) перший член називають гідростатичною, а другий – негідростатичною складовою індексу показника заломлення повітря. Зауважимо, що ця формула отримала широке застосування останнім часом.

Підставляючи замість відношення газових сталих чи молекулярних мас коефіцієнт, який дорівнює 0,622, та використовуючи рівняння стану для вологого повітря, рівняння (5) запишемо у вигляді:

$$N = K_1 \frac{P}{T} \left(1 - 0.378 \frac{e}{P} \right) + \left((K_2 - K_1 \cdot 0.622) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_w^{-1}, \quad (6)$$

Таблиця 1

Складові зенітної тропосферної затримки за результатами інтегрування, мм

№ моделі	$P, \text{гПа}$ $t, ^\circ\text{C}$	$e, \text{гПа}$ $f, \%$	d_h^z	d_{nh}^z	d_{trop}^z	δd_h^z	δd_{nh}^z	δd_{trop}^z
Антарктида								
Восток 08.07.59	629 -60,3	0,01 76	1426,6	2,2	1428,8	0,0 -0,8	0,0 0,0	0,0 -0,8
Мирний 24.07.59	984 -23,4	0,80 87	2228,7	17,7	2246,4	0,5 -0,8	-0,5 -0,5	0,0 -1,3
Ак.Верн Серпень	991 -13,8	1,79 85	2260,5	30,9	2291,4	1,0 -0,2	-1,0 -1,0	0,0 -1,2
Восток 20.01.59	631 -35,5	0,23 80	1439,0	4,5	1443,5	0,2 -0,4	-0,1 -0,2	0,1 -0,6
Мирний 17.01.59	982 -3,3	3,59 75	2234,1	39,9	2274,0	1,4 0,3	-1,4 -1,4	0,0 -1,1
Ак.Верн Січень	987 0,0	5,19 85	2247,1	60,0	2307,1	2,0 1,0	-2,0 -2,0	0,0 -1,0
Південно-західний регіон України								
1	1011,0 -3,8	3,64 79	2307,9	33,9	2341,8	1,2 0,1	-1,1 -1,1	0,1 -1,0
5	1011,6 -6,2	2,46 64	2306,5	35,2	2341,7	1,2 0,1	-1,2 -1,2	0,0 -1,1
13	1010,0 20,4	21,10 88	2294,1	178,8	2472,9	6,6 5,8	-6,4 -6,5	0,2 -0,7
14	1005,5 22,0	21,16 80	2287,5	245,5	2533,0	8,9 8,2	-8,8 -9,0	0,1 -0,8
Стандартна модель атмосфери								
CMA81	1013,25 15,0	8,53 50	2306,2	92,0	2398,2	3,3 2,4	-3,2 -3,3	0,1 -0,9

Члени формул (5) і (6) вже дещо відрізняються за змістом від відповідних у формулі (1) і не віддзеркалюють суху та вологу складові індексу показника заломлення повітря, оскільки у формулі (5) у першому члені наявна вологість у загальний густині повітря, що зображене у формулі (6) віртуальним додатком, а другий член “здеформовано” питомою газовою сталою (молекулярною масою) сухого повітря. Разом з тим, повна величина індексу показника заломлення повітря, обчислена за формулою (6), збігається повністю з відповідною величиною, отриманою за формулою (1), що підтверджено результатами табл. 1.

У цій роботі зображене дослідження лише зенітної тропосферної затримки радіохвиль. Інтегруванням моделей за даними аерологічного зондування вона визначається так:

$$d_{trop}^z = d_{d(h)}^z + d_{w(nh)}^z = 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} N_{d(h)} dH + 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} N_{w(nh)} dH, \quad (7)$$

де d_{trop}^z – повна зенітна тропосферна затримка; $d_{d(h)}^z$, $d_{w(nh)}^z$ – відповідно, суха (чи гідростатична) та волога (чи негідростатична) зенітна тропосферна затримка; H_s і H_a – межі інтегрування Для обчислення цих величин у позазенітній зоні використовують функції відображення.

На основі даних аерологічного зондування в різних регіонах і при різних кліматичних умовах було складено понад 50 моделей атмосфери. За цими моделями було отримано як окремі складові зенітної тропосферної затримки, так і повну величину її зі значеннями N за формулами (1), (4) і (6). Результати обчислень за окремими вибірковими моделями наведені в табл. 1. Тут Антарктида зображена результатами обчислень моделей атмосфери трьох основних регіонів – Центральної Антарктиди (станція “Восток”), Антарктичного узбережжя (станція “Мирний”) та Антарктичного півострова (станція “Академік Вернадський”) для зимового періоду (липень, серпень) і літнього (січень). Перші дві моделі Південно-західного регіону України підібрані для зими, дві інші – для літа. Крім цього, наведені результати обчислень і для стандартної моделі атмосфери СМА-81. Величини d_h^z , d_{nh}^z , d_{trop}^z – відповідно, гідростатична, негідростатична та повна зенітна тропосферна затримка, обчислені за формулою (6). Причому індекс показника заломлення повітря визначався за коефіцієнтами *Essen and Froome*; δd_h^z , δd_w^z , δd_{trop}^z – різниці, отримані між відповідними зенітними тропосферними затримками з використанням формул (6) і (1) – верхній рядок та (6) і (4) – нижній рядок. Відповідно, для першої та другої складової подамо їх так:

* верхній рядок –

$$\delta d_h^z = \int_{H_s}^{H_a} \left(K_1 \cdot 0,622 \frac{e}{T} \right) \cdot dH, \quad (8)$$

$$\delta d_{nh}^z = \int_{H_s}^{H_a} \left[-K_1 \cdot 0,622 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + \left(K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) \cdot (Z_w^{-1} - 1) \right] \cdot dH, \quad (9)$$

* нижній рядок –

$$\delta d_h^z = \int_{H_s}^{H_a} \left(K_1 \cdot 0,622 \frac{e}{T} Z_d^{-1} \right) \cdot dH, \quad (10)$$

$$\delta d_{nh}^z = \int_{H_s}^{H_a} \left(-K_1 \cdot 0,622 \frac{e}{T} Z_w^{-1} \right) \cdot dH . \quad (11)$$

Наведемо короткий аналіз отриманих результатів. Різниці між гідростатичною та сухою і негідростатичною та вологою складовими (верхній рядок) не перевищують 2 мм за абсолютною величиною при від'ємних температурах і суттєво збільшуються при зростанні температури і, відповідно, вмісту водяної пари в повітрі. Причому різниці повної зенітної тропосферної затримки практично у всіх випадках дорівнюють нулю. Приблизно аналогічно ведуть себе і різниці складових, обчисленіх із формулами (6) і (4) – нижній рядок, причому, для першої складової у всіх випадках вони в середньому на 1 мм менші, ніж у верхньому рядку, а для другої складової вони є ідентичні. Різниці між величинами зенітної сухої тропосферної затримки, отриманими через формули (4) і (1), становлять для станцій, порівняно близьких за висотами до рівня моря, від 0,7 мм при температурах $t \geq 20^{\circ}\text{C}$ (модель №14) до 1,3 при $t \leq -20^{\circ}\text{C}$ (модель “Мирний, 24.07.59”). В діапазоні температур, близьких за абсолютною величиною до 0°C , такі різниці становлять близько 1 мм. На станціях, розміщених на значних висотах над рівнем моря (станція “Восток”, $H \approx 3,5$ км), вказані різниці зменшуються за рахунок спаду загального атмосферного тиску повітря. Що ж стосується аналогічної різниці між величинами зенітної вологої тропосферної затримки, то у всіх регіонах і практично при різних кліматичних умовах вона дорівнює нулю і лише при значному вмісті водяної пари в повітрі ця різниця може досягати $-0,1 \div -0,2$ мм. Отже, при визначенні вологої тропосферної затримки практично у всіх випадках коефіцієнт стискування водяної пари можна зігнорувати.

Оскільки в програмному забезпеченні обробки GPS вимірювания впливу тропосферної затримки передбачає вибір однієї з багатьох аналітичних моделей, то нами проведено дослідження ряду таких моделей. Так, суха (гідростатична) і волога (негідростатична) складові повної зенітної тропосферної затримки визначались за трьома аналітичними моделями, а саме: моделлю *Saastamoinen* (SA) [7] та класичною і модифікованою моделями *Hopfield* (HO) [4,1]. Окремо волога (негідростатична) складова визначалась ще за допомогою семи моделей: *Ifadis* (IF), *Chao* (CH), *Askne and Nordis* (AN) – по одній моделі, а також *Baby* (BB) і *Berman* (BE) – по дві моделі. Алгоритми цих моделей і їх позначення запозичені з робіт [5,6]. Короткі характеристики цих моделей наведені нами в роботі [2]. В табл. 2 показані різниці δd_h^z і δd_{nh}^z між гідростатичною та негідростатичною складовими, отриманими за відповідними членами із використанням формули (6) і наведеними в табл. 1, та вказаними аналітичними моделями.

На основі результатів табл. 2 слід виділити таке:

*для гідростатичної складової за моделлю *Saastamoinen* спостерігаються в середньому порівняно з моделями *Hopfield* стабільніші різниці δd_h^z для різних регіонів і сезонів року. Якщо температура додатна, ці різниці отримують від'ємні значення і при зростанні її, а, відповідно, і вологості повітря, вони збільшуються за абсолютною величиною. Відхилення $-7,9$ мм та $+7,8$ мм, отримані за моделями “Мирний, 24.07.59” і “Ак. Вернадський, серпень”, пояснюються різними вертикальними профілями атмосферного тиску, що відрізняються від розподілу за основним рівнянням статики атмосфери. За *Hopfield*, для регіонів Антарктиди, модифікована модель порівняно із класичною дає зміщення в середньому на $+1$ мм, а для Південно-західного регіону України і стандартної моделі атмосфери на -1 мм.

*для негідростатичної складової

– відхилення δd_{nh}^z для Антарктиди за моделлю *Saastamoinen* приймають у всіх випадках додатні значення і певною мірою наслідують різниці гідростатичних складових, проте вони близькі до відповідних величин за класичною моделлю *Hopfield*. Для Південно-західного регіону України в літній період при значній вологості повітря як модель *Saastamoinen*, так і моделі *Hopfield* не забезпечують жодною мірою достатньої точності визначення вологої (негідростатичної) складової зенітної тропосферної затримки;

– стосовно моделей *Ifadis*, *Baby*, *Chao*, *Berman* та *Askne and Nordius* слід зауважити, що для регіонів Антарктиди можна рекомендувати як порівняно більш прийнятні першу модель *Berman*, для якої використовувались спеціальні емпіричні коефіцієнти для денного періоду (січень) і для нічного (липень, серпень), а також модель *Askne and Nordius*. До певної міри за точністю могла б підійти для Антарктиди і модель *Ifadis*, за винятком станції “Восток”, оскільки ця модель розроблена для початкових висот, близьких до рівня моря.

Таблиця 2

Складові зенітної тропосферної затримки за різними аналітичними моделями

№ моделі	δd_h^z SA	δd_{nh}^z SA	δd_h^z HO	δd_{nh}^z HO	δd_{nh}^z IF	δd_{nh}^z BB	δd_{nh}^z CH	δd_{nh}^z BE	δd_{nh}^z AN
Антарктида									
Восток 08.07.59	-3,6	2,0	-2,9 -3,6	1,8 1,9	-36,2	1,9	2,2	2,0 2,0	1,3
Мирний 24.07.59	-7,9	8,5	-13,8 -12,7	2,8 7,3	1,9	10,8 5,1	10,5	4,5 6,2	3,8
Ак.Верн Серпень	7,8	11,0	2,0 0,0	1,9 9,3	5,4	15,9 9,0	15,1	2,4 6,1	0,9
Восток 20.01.59	3,0	1,7	2,6 2,0	-0,6 1,2	-36,2	2,2 -1,1	3,0	1,4 1,0	1,0
Мирний 17.01.59	2,1	1,5	-4,9 -6,0	-10,1 0,0	-4,2	8,0 3,8	5,2	-2,3 -7,9	-3,5
Ак.Верн Січень	3,5	5,1	-3,7 -4,8	-8,8 3,6	0,6	12,5 10,2	6,2	-0,2 -8,2	-2,0
Південно-західний регіон України									
1	6,1	-5,1	2,9 1,7	-17,1 -6,7	-8,2	-15,3 -8,4	-1,6	-21,9 -14,6	-9,2
5	3,4	8,6	0,2 0,9	-0,5 7,2	5,1	0,0 5,2	13,2	-2,9 2,1	5,8
13	-5,4	-29,0	-11,1 -12,2	-27,1 -19,4	-25,6	-12,1 -1,7	-91,0	-118,0 -79,3	-46,1
14	-1,7	38,2	-7,6 -8,7	44,1 48,9	41,2	57,1 66,1	33,3	-50,6 -12,0	21,2
Стандартна модель атмосфери									
CMA 81	-1,0	-6,4	-5,9 -7,1	1,6 8,8	5,4	9,9 16,0	2,3	-30,3 -14,3	0,9

Підібрані нами емпіричні коефіцієнти для моделей *Baby*, *Chao* та *Askne and Nordius* дають змогу суттєво підвищити точність визначення вологої складової для Антарктичного

узбережжя та Антарктичного півострова [8]. Проте для остаточного підтвердження цього питання необхідно виконати перевірку на довших строкових рядах аерологічних зондувань.

Що ж стосується Південно-західного регіону України (очевидно, й інших регіонів також), то слід відзначити, що в літній період при значному вмісті водяної пари в повітрі (моделі № 13 і № 14) волога (негідростатична) складова визначається за всіма наведеними аналітичними моделями надто неточно. Зауважимо при цьому, що переважна більшість цих моделей розроблялась на основі глобально усереднених даних аерологічного зондування та стандартних моделей атмосфери американського континенту. Тому для України чи навіть окремих її регіонів, на яких розміщені або планується розташовувати перманентні GPS станції, доцільно, на наш погляд, ретельно аналізувати вертикальні профілі метеорологічних параметрів і, в першу чергу, парціального тиску водяної пари і на цій основі вдосконалювати існуючі чи розробляти нові аналітичні моделі атмосфери.

І на завершення хочу висловити щиру подяку науковому керівнику геодезичної лабораторії факультету геодезії та інженерної геоматики Університету Нью-Брунсвік (Канада), професору Річарду Ланглею за люб'язно надані нам наукові матеріали стосовно даної царині досліджень.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). К. 2. Заблоцький Ф.Д. Паляниця Б.Б. До аналізу моделей атмосфери при визначенні тропосферної затримки // Зб. доп. V наук.-техн. симп. "Геоінформаційний моніторинг навколошильного середовища - GPS i GIS- технології", 4-10 вересня 2000 р., Алушта. Львівське астр.-геод. товариство, Львів, 2000. С.33–41. 3. Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., Elgered G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*. Vol. 20. № 6. P. 1593–1607.
4. Hopfield H.S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*. 1969. Vol.74. №18. P.4487-4499.
5. Mendes V.B., Langley R.B. A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling 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. P. 12.
6. Mendes V.B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. diss., Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report № 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999. P.353.
7. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysics. Monogr. Vol.15. AGU, Washington, D.C., 1972. P.247-251.
8. Zablotskyj F. On the Nature of Tropospheric Delay in GPS and SLR Measurements in Polar Regions // Paper presented at the 2nd International Workshop on "Satellite Navigation in CEI Area", Olsztyn, 3-5 July, 2000.