

ТОЧНІСТЬ АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕГІДРОСТАТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ ПРИ GPS СПОСТЕРЕЖЕННЯХ

© Костецька Я., Торопа Т., 2003

Проведен анализ аналитических моделей для определения негидростатической составной зенитной тропосферной задержки. Также определена негидростатическая составная зенитной тропосферной задержки по данным аэрологического зондирования атмосферы.

In a paper is carried out the analysis of analytical models for the definition nonhydrostatic composite of zenith tropospheric delay. Also is defined nonhydrostatic composite of zenith tropospheric delay till data of aerological exploration of atmosphere.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими практичними завданнями

Однією із найістотніших похибок на результати GPS вимірів є похибка врахування тропосферної затримки. Приблизно 90 % величини тропосферної затримки становить вплив сухої (гідростатичної), а решта 10 % – вологої (негідростатичної) складової індексу показника заломлення повітря. Однак негідростатичну складову змодельовати значно складніше, а значить і врахувати. На теперішній час розроблені аналітичні моделі, які враховують або зменшують вплив тропосферної затримки. Отже, дослідження точності цих моделей є надзвичайно важливим і актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з цієї проблеми

Над врахуванням впливу атмосфери на результати GPS спостережень науковці у цілому світі працювали, починаючи від створення системи NAVSTAR, і продовжують працювати далі. Це питання розглядали в багатьох роботах. У Західній Україні останні найсуттєвіші дослідження і публікації з проблеми виконані Ф.Д. Заблоцьким, Б.Б. Паляницею і іншими. Деякі питання з досліджень аналітичних моделей висвітлені в роботах [5, 6].

Невирішені частини загальної проблеми

Більшість відомих і широко використовуваних аналітичних моделей для врахування негідростатичної складової тропосферної затримки розроблені переважно на основі глобально усереднених даних або на основі стандартних атмосфер, які на регіональному рівні себе не оправдовують.

Постановка завдання

Проаналізувати точність найвикористовуваніших аналітичних моделей для визначення негідростатичної складової тропосферної затримки.

Для аналізу затримки визначені за різними моделями порівнювались із значеннями, обчисленими за результатами 110 аерологічних зондувань на станції Львів, що проводились в нічний час.

Негідростатична складова зенітної тропосферної затримки визначалась нами за даними аерологічного зондування за формулами

$$d_w^z = 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} N_w dH; \quad (1)$$

$$N_w = (K_2 - K_1 \cdot 0,622) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (2)$$

де d_w^z – негідростатична зенітна тропосферна затримка; H_a і H_s – границі інтегрування; dH – висота біжучого прошарку атмосфери; T – абсолютна температура повітря, e – парціальний тиск водяної пари; K_1, K_2, K_3 – емпіричні коефіцієнти.

Оскільки в даних зондування атмосфери параметр вологості задавався відносною вологістю ($U, \%$), то для визначення парціального тиску водяної пари використовувалась залежність

$$e = \frac{U}{100} \cdot 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5t}{237,3+t}}. \quad (3)$$

За верхню межу інтегрування H_a прийнято висоти тропопаузи.

Підставивши коефіцієнти K_1, K_2 і K_3 , визначені Фрумом і Ессеном [4] у формули (1) і (2), були знайдені інтегральні значення негідростатичної складової зенітної тропосферної затримки d_w^{int} (табл. 1).

Таблиця 1

Значення K для моделей

	Berman 74	Berman (Night)	Berman (TMOD)
K	0,3224	0,3773	0,3281

Отримані значення негідростатичних затримок порівнювали із значеннями, отриманими за такими моделями:

– Saastamoinen (SA) (4)

$$d_w^z = 0,002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0,05 \right) e_s, \quad (4)$$

– Hopfield (5)

$$d_w^z = \frac{10^{-6} \left(-12,96 \cdot e_s + \frac{3,718 \cdot 10^5 \cdot e_s}{T_s} \right) \cdot h_w}{5 T_s}, \quad (5)$$

де h_w – висота атмосфери із вмістом водяної пари.

У цій моделі прийнято, що висота атмосфери із вмістом водяної пари дорівнює 11 км;

– Baby (BA) (6)

$$d_w^z = 10^{-3} U_s v \cdot 10^{r \cdot t_s} \quad (6)$$

де v , мм·(%)⁻¹ і γ , °C⁻¹ – емпіричні коефіцієнти залежно від широти і зміни клімату;

– Chao (CH) (7)

$$d_w^z = 4,7 \cdot 10^2 \frac{e_s^{1,23}}{T_s^2} + 1,71 \cdot 10^6 \frac{e_s^{1,46}}{T_s^3} \alpha \quad (7)$$

Ця модель не є дуже чутливою до градієнта температури і застосування середнього значення його $\alpha = 6,5^\circ \text{C} \cdot \text{км}^{-1}$ не має суттєвого впливу на точність моделі [2].

– Callahan (CA) (8)

$$d_w^z = \frac{1035 \cdot e_s}{T_s^2}, \quad (8)$$

– Ifadis (IF) (9)

$$d_w^z = 0,00554 - 0,88 \cdot 10^{-4} (P_s - 1000,0) + 0,272 \cdot 10^{-4} \cdot e_s + 2,771 \left(\frac{e_s}{T_s} \right), \quad (9)$$

– Моделі Berman BE 70 (10)

$$d_w^z = \frac{0,373}{\alpha(B - A \cdot C)} \left(1 - \frac{C}{T_s} \right)^2 e_s \quad (10)$$

$$e_s = 0,061 \cdot U_s \exp \left(\frac{A \cdot T_s - B}{T_s - C} \right), \quad (11)$$

де $A = 17,1485$, $B = 4684,1$, $C = 38,45$

BE 74, BE Night, BE TMOD (12).

Ці моделі відрізняються між собою лише значеннями константи K .

$$d_w^z = 10,946 \cdot K \left(\frac{e_s}{T_s} \right). \quad (12)$$

У формулах (4)–(12): e_s – приземне значення парціального тиску; t_s – приземне значення температури за шкалою Цельсія; T_s – приземне значення температури за шкалою Кельвіна; U_s – відносна вологість повітря; α – вертикальний температурний градієнт.

Опис цих моделей був запозичений з робіт [1, 3, 7]. Для обчислень використані матеріали наземних метеорологічних вимірів для тих самих дат, що і для визначення інтегральних значень.

Для аналізу затримок, отриманих за різними моделями, були обчислені різниці Δ між ними та затримками, визначеними за результатами аерологічного зондування (табл. 2). Ці різниці вважалися істинними помилками затримок, отриманих за моделями, бо затримки, обчислені за результатами зондування, можна прийняти за їх істинні значення.

Таблиця 2

Інтегральні значення негідростатичної складової
зенітної тропосферної затримки і різниці Δ , м

Дата	d_w^{int}	Δ_{SA}	Δ_{HO}	Δ_{BA}	Δ_{CH}	Δ_{CA}	Δ_{IF}	$\Delta_{\text{BE 74}}$	$\Delta_{\text{BE TMOD}}$	$\Delta_{\text{BE NIGHT}}$	$\Delta_{\text{BE 70}}$
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13
09.05.2002	0,113	-0,022	-0,024	-0,005	-0,016	0,000	-0,018	-0,002	-0,012	0,017	-0,015
11.05.2002	0,092	0,007	0,005	0,024	0,016	0,032	0,011	0,028	0,011	0,049	0,012

Продовження табл. 2

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13
15.05.2002	0,115	0,019	0,016	0,044	0,044	0,052	0,022	0,049	0,021	0,077	0,029
23.05.2002	0,102	-0,009	-0,011	0,007	-0,001	0,015	-0,005	0,012	-0,003	0,031	-0,003
25.05.2002	0,133	-0,013	-0,017	0,011	0,003	0,015	-0,010	0,014	-0,003	0,039	-0,003
27.05.2002	0,163	-0,039	-0,043	-0,013	-0,021	-0,010	-0,036	-0,011	-0,028	0,015	-0,028
29.05.2002	0,156	-0,028	-0,032	-0,004	-0,008	0,002	-0,025	0,000	-0,023	0,027	-0,019
02.06.2002	0,068	0,004	0,004	0,016	0,006	0,024	0,009	0,020	0,007	0,035	0,007
04.06.2002	0,052	0,014	0,013	0,025	0,014	0,031	0,019	0,029	0,020	0,042	0,017
06.06.2002	0,103	-0,003	-0,005	0,014	0,007	0,022	0,001	0,019	0,001	0,040	0,003
08.06.2002	0,131	-0,020	-0,022	-0,001	-0,005	0,009	-0,016	0,004	-0,021	0,027	-0,014
10.06.2002	0,154	-0,009	-0,013	0,017	0,021	0,027	-0,006	0,023	-0,011	0,053	0,001
12.06.2002	0,158	-0,023	-0,027	0,002	0,001	0,010	-0,021	0,007	-0,020	0,035	-0,013
14.06.2002	0,156	-0,036	-0,040	-0,013	-0,020	-0,008	-0,033	-0,010	-0,027	0,015	-0,027
16.06.2002	0,136	-0,016	-0,021	0,009	-0,001	0,011	-0,013	0,010	-0,004	0,035	-0,006
18.06.2002	0,137	-0,015	-0,019	0,008	0,003	0,014	-0,013	0,012	-0,010	0,037	-0,006
22.06.2002	0,141	-0,004	-0,011	0,029	0,018	0,026	-0,002	0,027	0,013	0,055	0,011
24.06.2002	0,153	-0,010	-0,018	0,025	0,014	0,019	-0,009	0,021	0,008	0,051	0,005
26.06.2002	0,060	0,012	0,011	0,025	0,013	0,031	0,017	0,028	0,020	0,044	0,017
28.06.2002	0,055	0,022	0,019	0,039	0,023	0,040	0,027	0,039	0,036	0,056	0,029
30.06.2002	0,060	0,013	0,011	0,025	0,014	0,031	0,017	0,029	0,019	0,044	0,016
02.07.2002	0,087	0,018	0,014	0,039	0,028	0,042	0,021	0,041	0,029	0,063	0,026
04.07.2002	0,180	-0,031	-0,039	0,006	-0,004	0,000	-0,029	0,002	-0,013	0,033	-0,015
06.07.2002	0,138	-0,020	-0,024	0,002	-0,004	0,008	-0,018	0,006	-0,014	0,030	-0,012
10.07.2002	0,127	0,012	0,005	0,043	0,034	0,041	0,014	0,042	0,027	0,071	0,025
12.07.2002	0,142	0,044	0,036	0,084	0,093	0,085	0,044	0,085	0,048	0,123	0,061
14.07.2002	0,142	0,001	-0,006	0,035	0,026	0,032	0,003	0,033	0,018	0,063	0,016
16.07.2002	0,111	0,038	0,031	0,073	0,066	0,070	0,040	0,071	0,053	0,102	0,053
18.07.2002	0,133	-0,015	-0,021	0,011	-0,001	0,011	-0,012	0,011	-0,001	0,035	-0,004
20.07.2002	0,178	-0,004	-0,012	0,033	0,038	0,035	-0,003	0,034	0,002	0,070	0,012
22.07.2002	0,068	0,035	0,032	0,056	0,045	0,059	0,039	0,058	0,047	0,080	0,044
28.07.2002	0,112	0,011	0,007	0,035	0,029	0,040	0,013	0,039	0,019	0,064	0,021
30.07.2002	0,124	0,010	0,004	0,039	0,031	0,039	0,012	0,039	0,023	0,067	0,022
03.08.2002	0,142	-0,006	-0,012	0,024	0,016	0,024	-0,003	0,024	0,007	0,052	0,007
05.08.2002	0,090	0,037	0,032	0,063	0,055	0,065	0,040	0,064	0,047	0,091	0,047
09.08.2002	0,180	-0,032	-0,038	-0,002	-0,003	0,002	-0,030	0,001	-0,026	0,031	-0,020
11.08.2002	0,193	-0,042	-0,048	-0,012	-0,012	-0,008	-0,040	-0,009	-0,036	0,022	-0,029
13.08.2002	0,132	0,003	-0,002	0,030	0,026	0,034	0,006	0,033	0,010	0,061	0,014
04.09.2002	0,093	0,037	0,033	0,061	0,058	0,068	0,038	0,065	0,041	0,092	0,046
08.09.2002	0,162	-0,040	-0,044	-0,017	-0,022	-0,011	-0,037	-0,013	-0,035	0,012	-0,031
12.09.2002	0,061	0,016	0,015	0,029	0,019	0,037	0,020	0,033	0,019	0,049	0,019
18.09.2002	0,100	-0,011	-0,011	0,004	-0,003	0,014	-0,006	0,009	-0,011	0,028	-0,007
20.09.2002	0,125	-0,008	-0,010	0,012	0,010	0,022	-0,005	0,018	-0,008	0,043	-0,001
22.09.2002	0,105	-0,005	-0,006	0,011	0,006	0,022	-0,001	0,017	-0,007	0,038	-0,001
26.09.2002	0,136	-0,025	-0,026	-0,007	-0,009	0,005	-0,021	0,000	-0,029	0,023	-0,020
04.10.2002	0,111	-0,015	-0,017	0,001	-0,006	0,010	-0,011	0,006	-0,012	0,026	-0,010
06.10.2002	0,086	0,004	0,003	0,019	0,011	0,028	0,008	0,024	0,005	0,042	0,008
08.10.2002	0,068	0,007	0,008	0,019	0,011	0,029	0,013	0,024	0,003	0,040	0,008
18.10.2002	0,162	-0,030	-0,034	-0,006	-0,007	0,002	-0,026	-0,001	-0,028	0,026	-0,021

Продовження табл. 2

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13
26.10.2002	0,051	0,016	0,016	0,026	0,017	0,035	0,021	0,030	0,015	0,044	0,017
28.10.2002	0,075	0,020	0,019	0,036	0,029	0,046	0,025	0,041	0,021	0,061	0,025
30.10.2002	0,052	0,000	0,001	0,008	-0,002	0,015	0,005	0,011	0,000	0,022	0,000
01.11.2002	0,038	0,016	0,017	0,024	0,014	0,032	0,021	0,028	0,016	0,039	0,016
07.11.2002	0,040	-0,005	-0,004	0,002	-0,009	0,006	0,000	0,003	-0,006	0,010	-0,006
11.11.2002	0,040	0,015	0,017	0,025	0,014	0,032	0,021	0,028	0,013	0,039	0,015
13.11.2002	0,059	-0,011	-0,010	-0,003	-0,013	0,004	-0,005	0,000	-0,012	0,010	-0,011
15.11.2002	0,056	0,013	0,013	0,025	0,014	0,032	0,019	0,029	0,019	0,043	0,017
19.11.2002	0,090	-0,010	-0,011	0,003	-0,006	0,012	-0,005	0,008	-0,008	0,024	-0,007
01.12.2002	0,099	-0,034	-0,032	-0,023	-0,032	-0,014	-0,029	-0,019	-0,037	-0,006	-0,033
03.12.2002	0,106	-0,068	-0,066	-0,061	-0,072	-0,055	-0,062	-0,059	-0,069	-0,051	-0,069
05.12.2002	0,109	-0,068	-0,066	-0,060	-0,071	-0,054	-0,062	-0,058	-0,070	-0,050	-0,069
13.12.2002	0,016	0,001	0,002	0,006	-0,003	0,007	0,007	0,004	0,000	0,008	-0,001
15.12.2002	0,039	-0,006	-0,004	0,001	-0,010	0,005	-0,001	0,002	-0,006	0,008	-0,007
21.12.2002	0,018	0,001	0,002	0,005	-0,003	0,008	0,008	0,005	0,001	0,009	0,000
23.12.2002	0,053	-0,025	-0,023	-0,019	-0,029	-0,015	-0,019	-0,019	-0,027	-0,013	-0,027
25.12.2002	0,029	-0,007	-0,006	-0,001	-0,012	0,001	-0,002	-0,002	-0,009	0,002	-0,009
27.12.2002	0,050	-0,030	-0,029	-0,025	-0,034	-0,023	-0,023	-0,025	-0,031	-0,021	-0,031
02.01.2003	0,069	-0,041	-0,039	-0,034	-0,045	-0,031	-0,034	-0,034	-0,043	-0,029	-0,042
06.01.2003	0,043	-0,015	-0,013	-0,008	-0,019	-0,005	-0,008	-0,009	-0,017	-0,003	-0,016
08.01.2003	0,054	-0,027	-0,026	-0,020	-0,032	-0,018	-0,020	-0,021	-0,030	-0,016	-0,029
10.01.2003	0,066	-0,047	-0,045	-0,041	-0,051	-0,039	-0,039	-0,042	-0,048	-0,038	-0,048
12.01.2003	0,039	-0,026	-0,024	-0,020	-0,029	-0,020	-0,020	-0,023	-0,027	-0,020	-0,027
14.01.2003	0,042	-0,011	-0,010	-0,005	-0,016	-0,001	-0,005	-0,005	-0,012	0,002	-0,012
16.01.2003	0,072	-0,020	-0,019	-0,011	-0,022	-0,004	-0,014	-0,008	-0,019	0,003	-0,019
18.01.2003	0,076	-0,038	-0,037	-0,031	-0,042	-0,026	-0,033	-0,030	-0,038	-0,022	-0,039
22.01.2003	0,038	0,008	0,010	0,017	0,005	0,023	0,014	0,018	0,005	0,028	0,007
24.01.2003	0,075	-0,015	-0,014	-0,005	-0,016	0,003	-0,010	-0,002	-0,019	0,010	-0,015
26.01.2003	0,055	-0,001	0,000	0,008	-0,003	0,015	0,003	0,011	-0,004	0,022	-0,002
30.01.2003	0,039	0,005	0,006	0,012	0,001	0,018	0,012	0,014	0,004	0,023	0,004
01.02.2003	0,039	-0,005	-0,004	0,001	-0,009	0,006	0,002	0,002	-0,006	0,009	-0,006
05.02.2003	0,066	-0,041	-0,040	-0,036	-0,045	-0,032	-0,032	-0,035	-0,041	-0,030	-0,042
11.02.2003	0,034	0,004	0,006	0,012	0,001	0,017	0,009	0,013	0,001	0,020	0,003
15.02.2003	0,051	-0,020	-0,018	-0,013	-0,024	-0,009	-0,014	-0,013	-0,022	-0,007	-0,021
17.02.2003	0,037	-0,014	-0,012	-0,007	-0,018	-0,005	-0,009	-0,009	-0,016	-0,004	-0,015
19.02.2003	0,048	-0,009	-0,007	-0,001	-0,012	0,004	-0,003	0,000	-0,012	0,008	-0,010
21.02.2003	0,060	-0,005	-0,003	0,005	-0,006	0,013	0,000	0,007	-0,008	0,019	-0,005
23.02.2003	0,056	-0,033	-0,031	-0,027	-0,037	-0,024	-0,028	-0,027	-0,034	-0,023	-0,034
25.02.2003	0,054	-0,031	-0,030	-0,026	-0,036	-0,024	-0,026	-0,026	-0,032	-0,022	-0,032
27.02.2003	0,064	-0,039	-0,037	-0,033	-0,043	-0,030	-0,033	-0,033	-0,040	-0,028	-0,040
01.03.2003	0,059	-0,018	-0,016	-0,010	-0,021	-0,004	-0,012	-0,008	-0,020	0,000	-0,019
03.03.2003	0,055	-0,018	-0,017	-0,011	-0,022	-0,006	-0,012	-0,010	-0,020	-0,003	-0,020
05.03.2003	0,039	-0,005	-0,004	0,001	-0,009	0,006	0,000	0,002	-0,007	0,009	-0,006
11.03.2003	0,076	-0,009	-0,008	0,002	-0,007	0,011	-0,005	0,006	-0,012	0,020	-0,009
13.03.2003	0,074	0,002	0,003	0,014	0,006	0,024	0,007	0,019	-0,002	0,034	0,003
15.03.2003	0,052	-0,005	-0,003	0,004	-0,007	0,010	0,000	0,006	-0,007	0,016	-0,005
19.03.2003	0,056	-0,008	-0,006	0,001	-0,010	0,008	-0,002	0,003	-0,008	0,013	-0,008

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13
21.03.2003	0,020	0,005	0,006	0,010	0,001	0,014	0,012	0,011	0,006	0,016	0,005
31.03.2003	0,073	-0,008	-0,007	0,003	-0,007	0,011	-0,002	0,007	-0,007	0,020	-0,006
02.04.2003	0,047	-0,007	-0,006	0,000	-0,011	0,006	-0,001	0,002	-0,007	0,010	-0,007
04.04.2003	0,086	-0,011	-0,010	0,001	-0,008	0,011	-0,006	0,005	-0,014	0,021	-0,010
06.04.2003	0,036	0,008	0,009	0,016	0,005	0,022	0,015	0,017	0,005	0,026	0,007
08.04.2003	0,053	-0,004	-0,002	0,005	-0,006	0,012	0,003	0,007	-0,007	0,018	-0,004
10.04.2003	0,058	-0,007	-0,005	0,002	-0,009	0,009	-0,001	0,004	-0,010	0,015	-0,008
12.04.2003	0,078	-0,012	-0,011	-0,002	-0,011	0,007	-0,007	0,002	-0,015	0,016	-0,012
14.04.2003	0,056	0,007	0,008	0,017	0,007	0,026	0,011	0,021	0,007	0,034	0,008
16.04.2003	0,065	-0,001	-0,001	0,009	-0,001	0,017	0,003	0,013	0,000	0,026	0,000
20.04.2003	0,043	0,010	0,010	0,018	0,007	0,025	0,015	0,022	0,013	0,033	0,011
22.04.2003	0,098	-0,015	-0,015	-0,001	-0,010	0,008	-0,010	0,004	-0,014	0,021	-0,012
24.04.2003	0,105	-0,040	-0,039	-0,029	-0,039	-0,021	-0,034	-0,025	-0,040	-0,012	-0,038
30.04.2003	0,201	-0,045	-0,050	-0,015	-0,010	-0,007	-0,043	-0,010	-0,045	0,022	-0,033

Далі обчислені суми квадратів цих різниць та середні квадратичні помилки кожної аналітичної моделі (табл. 3). За значеннями цих величин можна судити про точність наведених вище аналітичних моделей.

Таблиця 3

Середні квадратичні помилки аналітичних моделей, м

Модель	SA	HO	BA	CH	CA	IF	BE 74	BE TMOD	BE Night	BE 70
СКП, м	0,0226	0,0227	0,0251	0,0255	0,0268	0,0211	0,0261	0,0237	0,0394	0,0231

Висновки

З отриманих середньоквадратичних помилок бачимо, що найкращі результати мають п'ять моделей IF, SA, HO, BE 70, BE TMOD. Але навіть для цих моделей значення Δ можуть бути великими. Трохи гірші результати мають моделі BA, CH, BE 74, CA. Модель BE Night не рекомендується використовувати при опрацюванні GPS спостережень через великі значення середньоквадратичних помилок.

Малу точність отримуваних за моделями затримок можна пояснити тим, що більшість аналітичних моделей розробляли на основі стандартних моделей атмосфери і глобально усереднених даних аерологічного зондування.

Наведене вище дозволяє зробити висновок, що жодна з досліджених моделей не визначає негідростатичну складову зенітної затримки з задовільною точністю на території Західної України.

Перспективи подальших розвідок у цьому напрямку

Для отримання високої точності визначення віддалей до супутників потрібно уточнювати найкращі з існуючих моделей або розробляти нові аналітичні моделі, придатні для певного фізико-географічного регіону. При дуже відповідальних спостереженнях можна рекомендувати одночасно з GPS вимірами виконувати аерологічні зондування атмосфери.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика / Пер. з англ.; Під ред. Я.С. Яцківа. – 3-тє вид. – К.: Наукова думка, 2001. – 391 с. 2. Заблоцький Ф. Моделі атмосфери для визначення тропосферної затримки в полярних регіонах // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць. – Львів: Вид-во «Ліга-прес», 2001. – С. 37–42. 3. Заблоцький Ф.Д. До визначення зенітної тропосферної

затримки у GPS вимірах // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2000. – Вип. 60. – С. 33–38. 4. Фрум Л., Ессен Л. Скорость света и радиоволн. – М: Мир, 1973. – 196 с. 5. Костецька Я.М., Торопа І.М. Аналіз аналітичних моделей для визначення негідростатичної складової зенітної тропосферної затримки при GPS спостереженнях // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць. – Львів: Вид-во «Ліга-прес», 2003. – С. 37–42. 6. Костецька Я.М., Торопа І.М. Про врахування впливу тропосфери на результати GPS спостережень // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць. – Львів: Вид-во «Ліга-прес», 2002. – С. 146–151. 7. Mendes, V.B. and R.B. Langley (1995). "Zenith Wet Tropospheric Delay Determination Using Prediction Models: Accuracy Analysis." Cartografia e Cadastro, No. 2, June 1995. – P. 41–47. <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/carto&cada1995.pdf>.