

# ВИКОРИСТАННЯ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИПАДАЮЧОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ В АТМОСФЕРІ

**Н.І. Каблак, В.У. Клімик, І.В. Швалагін, Я.М. Мотрунич,  
Н.Д. Кучеревич**

Ужгородський національний університет, Лабораторія космічних досліджень,  
вул.Далека, 2а, 88000, Ужгород e-mail: [space@univ.uzhgorod.ua](mailto:space@univ.uzhgorod.ua)

Проведено порівняльний аналіз значень поправки у відстань при радіовіддалемірних спостереженнях, отриманих з використанням GPS-систем і іншими методами. Отримані гармоніки сезонних змін поправки. Визначені коефіцієнти регресійних залежностей середніх температур в тропосфері від температури на поверхні Землі, що спрощує обчислення випадаючої водяної пари на основі вологості атмосферної поправки.

## Вступ

За останні півтора десятка років став доступним для використання значний потенціал Глобальної системи визначення місцеположення (GPS), призначеної для навігації та визначення координат різних об'єктів, для наукових та прикладних досліджень. Головним фактором бурхливого розвитку GPS є її всепогодність, оперативність, висока точність та відносно невелика вартість.

Якщо на глобальному рівні такі методи космічної геодезії, як радіоінтерферометрія з наддовгими базами, лазерна локація ШСЗ можуть конкурувати з GPS, то використання GPS на регіональному рівні та на локальних геодинамічних полігонах є поза конкуренцією через її простоту експлуатації та мобільність груп спостерігачів.

До 1989р. стрімко зростає кількість GPS-приймачів, що використовуються для наукових і перш за все геофізичних цілей. Однак GPS-спостереження і послідовна обробка даних цих спостережень не засновувались на загальних стандартах, що ускладнювало геодинамічну інтерпретацію одержуваних результатів. Іншою проблемою було забезпечення наукової спільноти точними ефемеридами GPS-супутників, параметрами обертання Землі

і точної інформації про годинники GPS-супутників.

Для вирішення цих проблем Міжнародна геодезична асоціація вирішила створити Міжнародну геодинамічну GPS-службу (IGS). Офіційними продуктами IGS є: високоточні ефемериди GPS-супутників; параметри обертання Землі; координати і швидкості GPS-станцій мережі IGS; поправки до годинників GPS-супутників і GPS-станцій мережі IGS; іоносферна і тропосферна інформація. Продукти IGS використовуються в різних областях наукових досліджень: реалізація і покращення міжнародної земної системи відліку; моніторинг деформації твердої Землі; моніторинг обертання Землі; моніторинг вимірювання в гідросфері (рівень моря, льодяний покрив і т.д.); визначення орбіт супутників; моніторинг стану іоносфери; дослідження клімату, передбачення погоди.

## Використання GPS-технологій для визначення випадаючої водяної пари

Одним із застосувань GPS спостережень є визначення випадаючої водяної пари в атмосфері. Водяна пара, що міститься в атмосфері, є основним чинником при формуванні земного клімату, а короткочасні її зміни

впливають на погоду. Вплив нейтральної тропосфери на розповсюдження GPS-сигналу визначається співвідношенням:

$$\Delta\rho = 10^{-6} \int N dS + (L - G),$$

де  $N = N(S)$  – індекс рефракції вздовж кривої розповсюдження сигналу,  $L$  – шлях розповсюдження сигналу,  $G$  – геометрична відстань,  $\Delta\rho_1 = 10^{-6} \int N dS$  – поправка за рахунок зміни швидкості розповсюдження сигналу,  $\Delta\rho_2 = L - G$  – геометрична поправка. Індекс рефракції обчислюється за атмосферними параметрами [1]:

$$N = K_1 \left( \frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left[ K_2 \left( \frac{e}{T} \right) + K_3 \left( \frac{e}{T^2} \right) \right] Z_W^{-1},$$

де  $P_d$  і  $e$  – тиск сухого повітря і парціальний тиск водяної пари в мілібарах,  $T$  – абсолютна температура повітря,  $Z_d^{-1}, Z_W^{-1}$  – фактори стиснення сухого і вологого повітря,  $Z_d, Z_W$  – коефіцієнти стиснення сухого повітря і водяної пари;  $K_1$  – коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря ( $\text{К}\cdot\text{мбар}^{-1}$ ),  $K_2$  – коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води ( $\text{К}\cdot\text{мбар}^{-1}$ ),  $K_3$  – коефіцієнт, що відображає вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води ( $10^5 \text{К}^2\cdot\text{мбар}^{-1}$ ). Із рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$N_1 = K_1 R_d \rho + \left[ K_2 \left( \frac{e}{T} \right) + K_3 \left( \frac{e}{T^2} \right) \right] Z_W^{-1}, \quad (1)$$

де

$$K_2' = K_2 - K_1 \left( \frac{R_d}{R_W} \right) = K_2 - K_1 \frac{M_W}{M_d},$$

$R_d = 287,06 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  – питома газова стала сухого повітря,  $R_W = 461,525 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  – питома газова стала водяної пари,  $\rho$  – загальна густина повітря,  $M_d$  і  $M_W$  – молекулярні маси сухого повітря і водяної пари. Перший член в рівнянні (1) – показник заломлення сухого (гідростатичного) повітря.

Інтеграл в зенітному напрямку дає поправку за рахунок впливу гідростатичної складової:

$$\Delta\rho_d = d_h^z = 10^{-6} K_1 R_d \int_{r_s}^{r_a} \rho dh,$$

де  $r_s$  – геоцентричний радіус антени приймача,  $r_a$  – геоцентричний радіус вершини нейтральної атмосфери. Атмосферна поправка у відстань, спричинена впливом водяної пари

$$\Delta\rho_W^z = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{\max}} \left[ K_2' \left( \frac{e}{T} \right) + K_3 \left( \frac{e}{T^2} \right) \right] Z_W^{-1} dh. \quad (2)$$

Формули для визначення середньої температури в атмосфері  $T_m$  запропонував Девіс [2]:

$$T_m = \int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T} Z_W^{-1} dh / \int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T^2} Z_W^{-1} dh.$$

Підставимо її в (2), замінивши  $T$  середнім значенням:

$$\Delta\rho_W^z = 10^{-6} \left[ K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right] \int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T} Z_W^{-1} dh. \quad (3)$$

З рівняння стану газу отримаємо:

$$\left( \frac{e}{T} \right) Z_W^{-1} = \rho_W R_W,$$

де  $\rho_W$  – густина водяної пари. Тоді (3) матиме вигляд:

$$\Delta\rho_W^z = 10^{-6} R_W \left[ K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right] \int_{h_0}^{h_{\max}} \rho_W dh. \quad (4)$$

Інтеграл в (4) є так звана інтегрована водяна пара (IWV) – загальна маса водяної пари в стовпчику повітря від поверхні Землі до кінця атмосфери з поперечним перерізом  $1 \text{ м}^2$  і виражається в  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$ :

$$IWV = \int_{h_0}^{h_{\max}} \rho_W dh. \quad (5)$$

Ця величина може бути легко переведена в одиниці довжини, якщо розділити її на густину води ( $\rho(\text{H}_2\text{O}) \cong 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ). Тоді вона інтерпретується як висота (в мм) стовпа води перерізом  $1 \text{ м}^2$ , отриманої із сконденсованої пари. Її можна назвати випадваючою водяною парою або просто випадваючою водою (PW):

$$PW = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \int_{h_0}^{h_{\max}} \rho_W dh, \quad (6)$$

Очевидно, що  $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \text{ IWV}$  відповідає  $1 \text{ мм PW}$ . Підставляючи (5) в (4) одержимо [3]:

$$\Delta \rho_W^z = \xi \cdot \text{IWV}, \quad (7)$$

де

$$\xi = 10^{-6} R_W \left[ K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right], \quad (8)$$

$R_W, K_2', K_3$  – константи. В (8) невідомою є тільки середня температура. Отже, для визначення випадваючої води за формулою (7) необхідно знати вологу затримку  $\Delta \rho_w$  і середню температуру  $T_m$ . Середня температура залежить від поверхневої температури з великим коефіцієнтом кореляції. Також спостерігається кореляція з широтою місця спостережень, але залежність від широти добре корелюється поверхневою температурою. Залежність від висоти дуже слаба.

### Експериментальні дослідження

Для точного визначення величини поправки  $\Delta \rho$  необхідно знати реальні миттєві значення метеопараметрів вздовж шляху розповсюдження електромагнітної хвилі [4]. У випадку відсутності таких даних використовують модельне представлення поправки  $\Delta \rho$ .



Рис.1. Атмосферні поправки у відстань в проміжку 30 днів на час  $UT=12^h$ , отримані в 2004р. для п.Київ трьома методами.

На основі даних аерологічного зондування атмосфери за 2003р. в

пунктах Ужгород, Харків, Сімферополь та за даними протягом 2002-2004рр. в пункті Київ зроблено порівняльний аналіз значень поправок  $\Delta \rho_e$  (еталонні значення), визначених за даними аерологічного зондування, значень поправок  $\Delta \rho_{GPS}$ , знайдених за даними GPS-спостережень, а також значень  $\Delta \rho_s$ , обчислених по моделі Саастамойнена, з використанням тільки наземних значень метеопараметрів  $p_0, T_0, W_0$ . На рис.1 наведені значення атмосферних поправок в проміжку 30 днів 2004 року на моменти  $UT = 12^h$  в п.Київ, отримані різними методами: за аерологічними даними (еталон), по моделі Саастамойнена і із GPS-спостережень. На горизонтальній вісі – № дня року, починаючи з першого січня. Результати трьох методів мало відрізняються між собою. На рис.1 видно, що максимальна поправка спостерігається в кінці липня – на початку серпня.

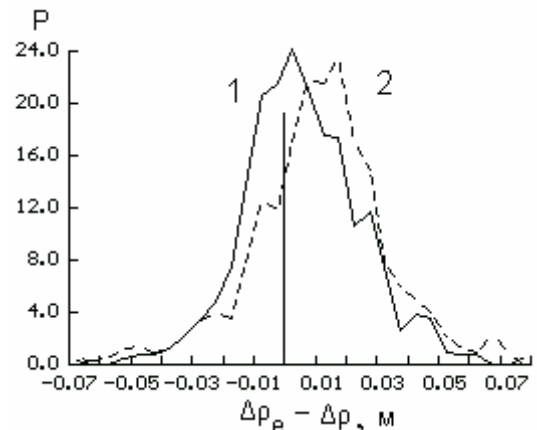


Рис.2. Розподіл різниць атмосферних поправок  $\Delta \rho_e - \Delta \rho_s$  (1) і  $\Delta \rho_e - \Delta \rho_{GPS}$  (2) за 2002 – 2004 роки в п.Київ при  $UT = 0^h$ .

На значення поправки в радіодіпазоні великий вплив мають інверсії температури, які зумовлюють зростання парціального тиску атмосфери, який впливає на величину поправки  $\Delta \rho_e$  і  $\Delta \rho_{GPS}$ . В таблиці 1 подано середні значення різниць  $\Delta \rho_e - \Delta \rho_s$  і  $\Delta \rho_e - \Delta \rho_{GPS}$  і середні квадратичні відхилення  $\sigma$  від середнього значення за даними метеорологічних спостережень в п.Київ в 2002-2004 рр. Значення поправок  $\Delta \rho_{GPS}$  взято із центрів обробки GPS-

спостережень (ГАО НАНУ та NASA). Центри обробки тропосферну поправку  $\Delta\rho_{GPS}$  визначають як невідомий параметр на деякому проміжку часу спостережень, наприклад, на інтервалі 1 година. Метеорологічні дані для обчислень  $\Delta\rho_e$  і  $\Delta\rho_S$  взяті з інтернету.

На рис.2 наведено густини розподілів різниць  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$  і  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$  за даними спостережень в Києві протягом трьох років. По вертикальній осі – частота  $P$ ,

віднесена до одиничного інтервалу значень цих різниць:

$$P = \frac{m}{n \cdot \Delta d},$$

де  $m$  – число значень різниць  $d$ , що попадає в відповідний інтервал розбиття  $\Delta d$ ,  $n$  – число всіх значень  $d$ , що викорипстовуються в обчисленнях. Довжина інтервалів розбиття  $\Delta d = 0,01\text{м}$ .

Таблиця 1. Середні значення та середнє квадратичне відхилення  $\sigma$  різниць атмосферних поправок

	2002		2003		2004		2002 ÷ 2004	
	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$
Середнє	0.006	0.014	0.005	0.008	0.006	0.015	0.005	0.012
$\sigma$	0.015	0.015	0.020	0.017	0.018	0.023	0.018	0.018

Розподіл різниць  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$  і особливо  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$  зсунутий вправо від нульового значення (вертикальної лінії на рис.2 вказано). Це означає, що метод Саастамойнена і GPS дають дещо занижені значення поправок.

Значення поправок у відстань змінюється протягом року. З деяким наближенням цю зміну можна виразити гармонікою з періодом близько 1 року [5]. На рис.3 точками наведені значення атмосферних поправок у віддаль  $\Delta\rho$  при радіовіддалемірних спостереженнях за даними аерологічного зондування атмосфери на час  $UT = 00^h$  в п.Київ протягом 2002-2004 рр. По горизонталь-

ній осі –  $n$ , номер дня, починаючи з 1 січня 2002р. Добре помітні сезонні зміни значень поправок: влітку вони значно більші, ніж взимку.

Середнє значення поправки  $\Delta\rho$  на кожний день року можна виразити синусоїдою, знайденою за методом найменших квадратів. На  $UT = 0^h$  (рис.3) та  $UT = 12^h$  для Києва їх відповідно можна виразити функціями:

$$\Delta\rho = 0.0474 \sin\left(\frac{2\pi n}{368.782} + 242.835^\circ\right) + 2.3643, \quad (9)$$

$$\Delta\rho = 0.0413 \sin\left(\frac{2\pi n}{366.929} + 234.574^\circ\right) + 2.3557. \quad (10)$$

Підставляючи у формули (9), (10) номер дня  $n$  від початку 2002р., можна прогнозувати значення поправки  $\Delta\rho$  на кожний день року, відповідно на  $UT = 0$  і  $12$  годин. Середня квадратична похибка визначення прогнозованої поправки складає  $\sigma = 0.03$  м.

Використовуючи співвідношення (9) і (10), неважко підрахувати, що максимального значення поправки  $\Delta\rho$  слід чекати приблизно 1 серпня, мінімального – через півроку, в кінці січня.

Використання GPS-систем дозволяє проводити регіональний моніторинг випадваючої водяної пари. Використо-

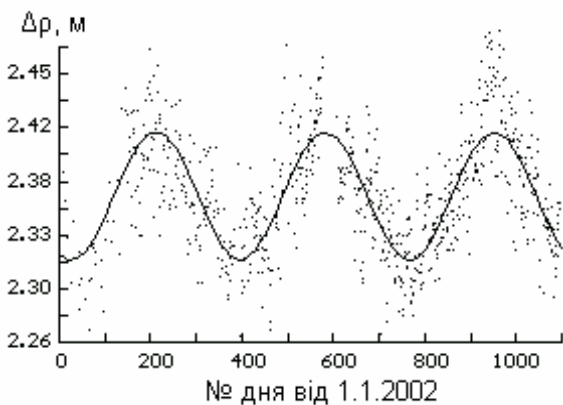


Рис.3. Сезонні зміни поправок у відстань і їх представлення гармонікою за даними зондування атмосфери в п.Київ протягом 3 років,  $UT=0^h$

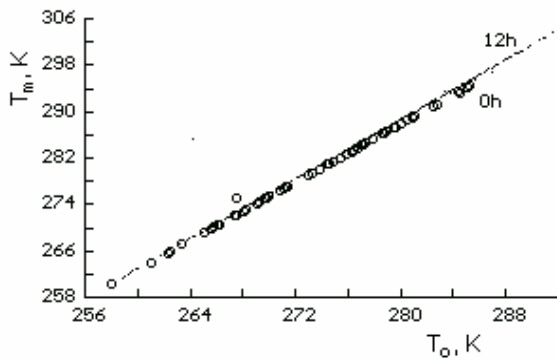


Рис.4. Залежність середньої температури від поверхневої температури при  $UT = 12^\circ$  і  $UT = 0^\circ$  в п.Київ, 2004р.

вуючи значення тропосферної затримки, отримане при обробці GPS-спостережень, випадаючу водяну пару (IWV) можна визначити за формулами (7) і (8). Для цього необхідно знати середню температуру атмосфери  $T_m$  над даним пунктом. Вона кореляційно залежить від

температури  $T_0$  на поверхні Землі в пунктах спостереження:

$$T_m = a \cdot T_0 + b. \quad (11)$$

В таблиці 2 приведені значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ , знайдені методом найменших квадратів та коефіцієнти кореляції  $\rho$ , а також середні квадратичні відхилення  $\sigma$  для чотирьох пунктів за даними спостережень опівночі в 2003 – 2004 роках.

На рис.4 наведені значення середньої і поверхневої температури для окремих спостережень в Києві, за якими отримані лінії регресії (11) на час  $UT = 12^h$  (точки) і  $UT = 0^h$  (кружечки). Спостереження проводились протягом 2004 року.

Регресійна залежність (11) дає змогу визначити середню температуру  $T_m$  атмосфери, маючи тільки наземні значення температури  $T_0$ .

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$ , коефіцієнта кореляції  $\rho$  та середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  кореляційної залежності  $T_m$  від  $T_0$  ( $UT = 0^h$ )

	Ужгород, 2003р.	Харків, 2003р.	Сімферополь, 2003р.	Київ, 2003р.	Київ, 2004р.
$a$	1.0383	0.9972	1.2553	0.7971	1.2497
$b$	-6.7844	4.9058	-63.6159	50.5330	-62.0758
$\rho$	0.9423	0.9085	0.9999	0.9463	0.9951
$\sigma$	3.0940	3.6081	0.0986	2.6433	0.8185

На основі даних аерологічного зондування атмосфери протягом 2002-2004 рр. в п.Київ та протягом 2003р. в пп. Ужгород, Харків, Сімферополь, обчислені значення випадаючої водяної пари IWV за формулами (7), (8), (11).

Основні характеристики отриманих результатів на час  $UT = 0^h$  наведені в таблиці 3. Точність визначення IWV становить 2 мм.

Таблиця 3. Значення випадаючої водяної пари IWV в мм,  $UT = 0^h$

	Ужгород, 2003р.	Харків, 2003р.	Сімферополь, 2003р.	Київ, 2002р.	Київ, 2003р.	Київ, 2004р.
Мінімальне	5.14	5.10	6.38	2.29	2.30	2.70
Середнє	19.40	17.02	17.08	15.26	14.61	16.19
Максимальне	40.24	36.74	38.39	42.75	35.81	39.58

### Висновки

Використання GPS-систем дозволяє проводити моніторинг випадаючої водяної пари. Вихідними даними для цього можуть бути дві величини – волога

поправка  $\Delta\rho_w$  і поверхнева температура. Поправки, отримані за даними GPS-спостережень, мало відрізняються від еталонних значень. Регресійні залежності

середньої температури від поверхневої різни в окремих пунктах і в різні роки спостережень. Подібні дослідження слід провести для всіх пунктів України, де існують перманентні GPS-станції.

#### Література

1. Козаков Л.Я., Ломакин В.С. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. – 156 с
2. Boud S., Kiriazes J. et al. // GPS World. –Vol.8, N 1.– 1997. – P.20-32.
3. Mironov N., Shvalagin I., Kablak N. // Earth rotation, reference systems in geodynamics and solar system. – Varschava, 18-19 Sept. 1995. – P.161-164.
4. Каблак Н.І., Клімик В.У. і ін. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. – Вип.5. – Ужгород, 1999. – С.67-70.
5. Каблак Н.І., Клімик В.У. і ін. // Космічна наука і технологія. – Т.10, №5/6, – К.: НКАУ, НАНУ, 2004. – С.159-163.

## USAGE OF GPS-OBSERVATION FOR DEFINITION OF FALLING OUT WATER VAPOUR IN ATMOSPHERE

**N.I.Kablak, V.U.Klimyk, I.V.Shvalagin, Y.M.Motrunch,  
N.D.Kutsherevytsh**

Uzhgorod National University, Laboratory of space researches,  
Daleka str. 2a, 88000, Uzhgorod, Ukraine. e-mail: [space@univ.uzhgorod.ua](mailto:space@univ.uzhgorod.ua)

The comparative analysis of values of the correction in distance at radioring observations obtained with usage of GPS-systems and other methods, is executed. The harmonics of seasonal changes of the correction are obtained. коэффициенты регрессионных of relations of mean temperatures in тропосфере from temperature on a surface of the Earth are determined, that simplifies calculations of a water vapor on the basis of the wet atmospheric correction.