

1. Багров А. В., Ерпылев Н. П., Микуша А. М. и др. Экспериментальная геодинамика: наблюдения геостационарных ИСЗ // Науч. информ.—1991.—Вып. 69.—С. 35—51.
2. Хуторовский З. Н., Каменский С. Ю., Бойков В. Ф., Смелов В. Л. Риск столкновения космических объектов на низких высотах // Столкновения в космическом пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995.— С. 19—90.

**HAZARD OF COLLISIONS OF ARTIFICIAL SPACE OBJECTS IN GEOSYNCHRONOUS ORBITS**

V. P. Epishev, I. I. Motrunych, V. U. Klimyk

We present the spatial distribution of unguided objects in the zone of geosynchronous satellites, distribution of orbital elements for these objects, and distribution of parameters of relative motion at their rendezvous with controlled geostationary satellites. The probabilities of collision between unguided objects as well as of their collision with controlled geostationary satellites are studied.

УДК 528.28:629.783

© Н. І. Каблак, В. У. Клімик, І. В. Швалагін, У. І. Каблак

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

**МОНІТОРИНГ ВИПАДАЮЧОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ  
ЗА ДОПОМОГОЮ GPS ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДИ**

Волога зенітна затримка, яка одержується із аналізу даних GPS-спостережень, може бути перетворена у значення випадаючої водяної пари, що дає вагомий внесок у моделювання клімату та оперативне передбачення погоди. При цьому повинно бути відоме значення середньої температури в атмосфері. Приведено оцінку значень випадаючої водяної пари в пункті Київ.

**Вступ.** Для точного прогнозу погоди необхідна інформація виключної якості з високим просторово-часовим розділенням. Через різні обмеження традиційні спостереження у радіодіапазоні або в системі метеорологічних супутників часто не враховують такий важливий параметр, як тропосферна водяна пара. Використання GPS дозволяє застосувати недорогу технологію для регіонального і глобального моніторингу вмісту водяної пари. Параметр тропосферної затримки  $\Delta\rho$  електромагнітної хвилі є основною величиною при побудові та аналізі метеорологічної моделі для прогнозування погоди. Тропосферна затримка складається з двох компонентів: зенітної гідростатистичної затримки  $\Delta\rho_d$ , яка залежить від стану сухої складової атмосфери, і зенітної вологої затримки  $\Delta\rho_w$ , яка залежить від вологості повітря.

Похибки врахування тропосферної рефракції в GPS-вимірюваннях впливають перш за все на загальний масштаб геодезичних вимірювань і на точність визначення висоти пунктів спостережень, а також на горизонтальні координати даних пунктів.

**Вплив нейтральної атмосфери на GPS-вимірювання.** Вплив нейтральної тропосфери на розповсюдження GPS визначається поправкою у відстань [1, 2, 4, 5]:

$$\Delta\rho = 10^{-6} \int N ds + (L - G), \quad (1)$$

де  $N = N(S)$  — індекс рефракції вздовж кривої розповсюдження сигналу,  $L$  — шлях розповсюдження сигналу,  $G$  — геометрична відстань. Перша складова поправки (1) — це поправка за рахунок зміни швидкості розповсюдження сигналу, друга — геометрична поправка. Індекс рефракції [2, 4] визначається формулою

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

де  $P_d$ , мбар — тиск сухого повітря;  $e$ , мбар — парціальний тиск водяної пари;  $T$ , К — температура повітря;  $Z_d^{-1}$ ,  $Z_w^{-1}$  — фактори стиску сухого і вологого повітря або величини, обернені коефіцієнтам стиску сухого повітря і водяної пари;  $K_1$ , К/мбар — коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря;  $K_2$ , К/мбар — коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води;  $K_3$ ,  $10^5$  К<sup>2</sup>/мбар — коефіцієнт, що відображає вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води.

Із рівняння Менделєєва — Клапейрона одержуємо

$$N = K_1 R_d \rho + \left[ K_2' \left( \frac{e}{T} \right) + K_3 \left( \frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1}, \quad (2)$$

де

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

$R_d = 287.06 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$  — питома газова стала сухого повітря,  $R_w = 461.525 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$  — 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 (2) — показник заломлення сухого повітря.

Інтеграл в зенітному напрямку дає поправку за рахунок впливу сухої складової атмосфери:

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

де  $r_s$  — геоцентричний радіус антени,  $r_a$  — геоцентричний радіус вершини нейтральної атмосфери,  $dz$  — одиниця довжини.

Атмосферна поправка у відстань до штучних супутників Землі, спричинена впливом водяної пари, в зеніті становить

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

**Визначення випадаючої водяної пари за допомогою GPS-спостережень.** Вміст водяної пари в атмосфері — це одна з найбільш важливих змінних, що формує клімат Землі. Короточасні зміни — це суттєва і необхідна частина інформації для прогнозування погоди. Розподіл водяної пари в атмосфері можна визначити за допомогою радіозондів. Один з головних недоліків радіозондів — це відносно низька точність датчиків в результаті забруднення їх під час запуску.

Використання GPS-систем дозволяє проводити регіональний та глобальний моніторинг випадаючої водяної пари. Використовуючи значення тропосферної затримки, одержане при обробці GPS-спостережень, випадаючу водяну пару ( $IWV$ ) можна визначити за формулою [3]

$$IWV = \Delta \rho_w^z / \xi, \quad (3)$$

де

$$\xi = 10^{-6} R_w \left[ K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right].$$

В останній формулі середню температуру  $T_m$  можна знайти із формули [3]:

$$T_m = \left( \int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T} Z_w^{-1} dh \right) / \int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} dh.$$

Отже, для переходу від  $\Delta \rho_w$  до значень випадаю-

чої водяної пари необхідно знати середню температуру атмосфери над даним пунктом. З цією метою потрібно побудувати регресійні залежності середньої температури  $T_m$  від температури на поверхні Землі  $T_0$  у пунктах спостереження.

**Експериментальні дослідження.** На основі даних аерологічного зондування атмосфери (значення  $T$ ,  $P$ ,  $W$ ) в пункті Київ в 2002 та 2003 рр. зроблено порівняльний аналіз значень поправок  $\Delta \rho_e$  (еталонні значення), визначених прямим методом за даними аерологічного зондування, значень поправок  $\Delta \rho_{GPS}$ , знайдених оберненим, незалежним методом (за даними GPS-спостережень), а також значень  $\Delta \rho_s$ , обчислених по моделі Саастамойнена, з використанням тільки наземних значень метеопараметрів  $\rho_0$ ,  $T_0$ ,  $W_0$ .

На рис. 1 наведено значення атмосферних поправок у віддаль при радіовіддалемірних спостереженнях за даними аерологічного зондування атмосфери в п. Київ протягом 2002–2003 рр. По горизонтальній осі — номер дня, починаючи з 1 січня 2002 р. Добре помітні сезонні зміни значень поправок: влітку вони значно більші, ніж взимку. Середнє значення поправки  $\Delta \rho$  на кожний день року виражається синусоїдою (рис. 1), знайденою за методом найменших квадратів:

$$\Delta \rho = A \sin \left( \frac{2\pi n}{T} + \varphi \right) + \Delta \rho_0, \quad (4)$$

де амплітуда  $A = 0.0399$  м, період  $T = 356.17$  діб, фаза  $\varphi = 227.41^\circ$ , вісь синусоїди (середнє значення поправки)  $\Delta \rho_0 = 2.3588$  м,  $n$  — номер дня від початку 2002 р.; середня квадратична похибка  $\sigma = 0.0327$  м.

На рис. 2 наведено розподіл різниць атмосферних

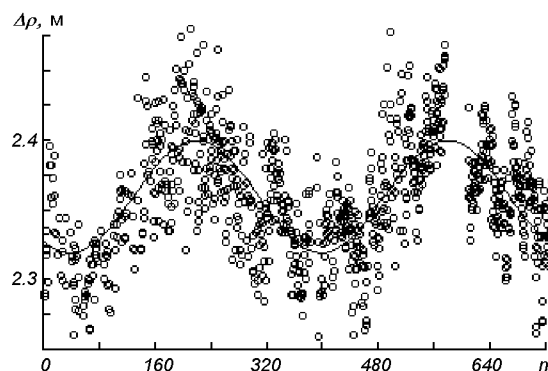


Рис. 1. Сезонні зміни поправок у віддаль при радіовіддалемірних спостереженнях за даними аерологічного зондування атмосфери в пункті Київ протягом 2002–2003 рр.

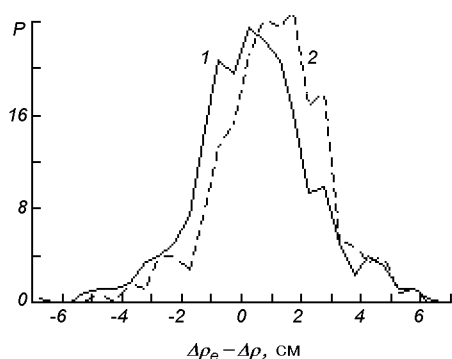


Рис. 2. Розподіл різниць  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$  (1) і  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$  (2)

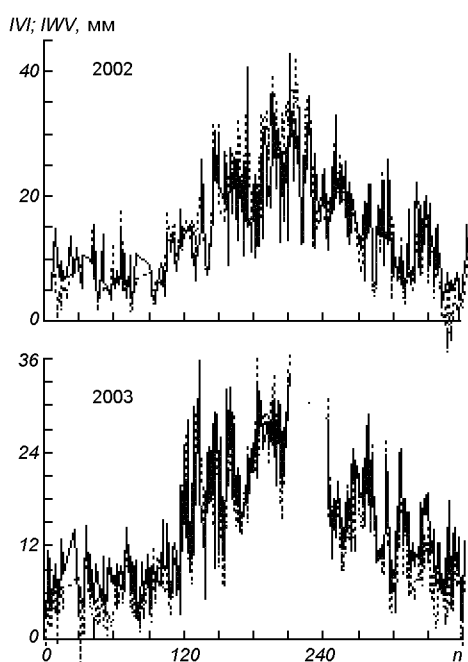


Рис. 3. Річні зміни випадаючої водяної пари, п. Київ, 2002 та 2003 рр.

поправок  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_S$  та різниць  $\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$  за 2002—2003 рр. в п. Київ. По вертикальній осі — частота випадків, віднесена до одиничного інтервалу значень цих різниць  $d$ :

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

де  $m$  — число значень  $d$ , що попадає в відповідний інтервал  $\Delta d$ ;  $k$  — число всіх значень  $d$ , що використовувалися в обчисленнях.

Розходження між  $\Delta\rho_e$  і  $\Delta\rho_S$  пояснюються тим, що  $\Delta\rho_S$  не враховує вертикальний розподіл змін мете-

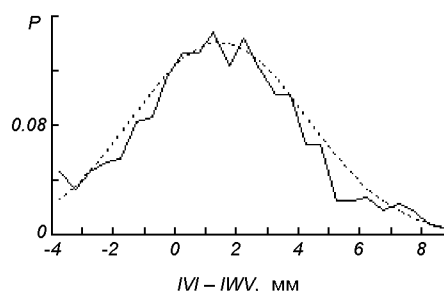


Рис. 4. Розподіл значень  $IVI - IWV$  і крива Гаусса

орологічних параметрів. На значення поправки в радіодіапазоні великий вплив також мають інверсії температури, які зумовлюють зростання парціального тиску, що впливає на величину поправки.

Графік розподілу різниць  $(\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS})$  зміщений відносно початку координат. При обробці GPS-спостережень  $\Delta\rho_{GPS}$  визначається як невідомий параметр на деякому проміжку часу спостережень, наприклад, на інтервалі 1 год [1].

На основі даних аерологічного зондування атмосфери протягом 2002 і 2003 рр. у пункті Київ обчислені значення випадаючої водяної пари  $IVI$  (суцільна крива на рис. 3) за формулою (3). Пунктирна крива на рис. 3 — значення випадаючої водяної пари  $IWV$ , знайдені за даними GPS-спостережень.

У пункті Київ за даний період досліджень  $IWV$  змінюється в межах від 0 до 35 мм, що співпадає із даними досліджень для регіону Німеччини [3].

За даними спостережень в 2002—2003 рр. в Києві знайдено розподіл різниць  $d = IVI - IWV$  (рис. 4, суцільна крива). Інтервали групування різниць  $\Delta d = 0.5$  мм. Розподіл близький до кривої Гаусса (пунктирна крива на рис. 4) з параметрами: середнє значення  $d_c = 1.45$ , середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 2.829$ . Середнє квадратичне відхилення отриманого розподілу від кривої Гаусса — 0.012.

Беручи до уваги, що точність визначення  $IWV$  становить 2 мм, можна стверджувати, що різниці між одержаними значеннями випадаючої водяної пари двома методами практично немає.

Якість прогнозу погоди, тобто визначення випадаючої водяної пари в атмосфері залежить від точності визначення середньої температури. Для пункту Київ запропоновано визначити середню температуру за регресійною залежністю (рис. 5), знайденою за даними аерологічного зондування в Києві в 2002—2003 рр.:

$$T_m = 0.7776200T_0 + 55.5098500,$$

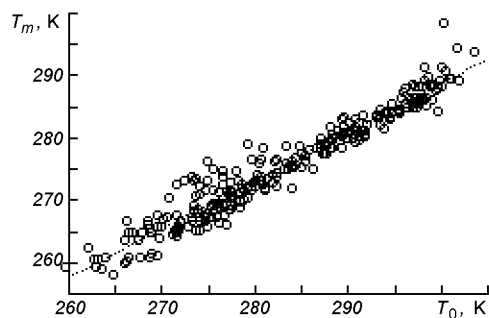


Рис. 5. Залежність середньої температури від поверхневої температури

коефіцієнт кореляції  $\rho = 0.9686$ , середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 2.12588$ .

**Висновки.** Використання GPS-систем дозволяє проводити регіональний та глобальний моніторинг випадаючої водяної пари — одного з найважливіших параметрів, що формує клімат Землі. Його короткочасні зміни — це суттєва і необхідна частина інформації для прогнозування погоди. Тому дані дослідження слід провадити для всіх пунктів України, де існують перманентні GPS-станції. Нездоліком GPS-спостережень є те, що вони не дають

інформації про вертикальний розподіл водяної пари. Значення випадаючої водяної пари для п. Київ змінюється в межах від 0 до 35 мм.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика. — К.: Наук. думка, 1996.—376 с.
2. Каблак Н. І., Клімук В. У. та ін. // Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. Фізика.—1999.—№ 5.—С. 67—70.
3. Herring T. A., Anthes R. A., Ware R. H. GPS Metrology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the GPS. // J. Geophys. Res.—1992.—97.—P. 15787—15801.
4. Mironov N., Shvalagin I., Kablak N. Earth rotation, reference systems in geodynamics and solar system. — Varschava, 18-19 September 1995.—P. 161—164.
5. Saastamoinen I. I. Contribution to the theory of atmospheric refraction // Bull. geod.—1973.—107.—P. 13—34.

#### MONITORING OF THE BESIEGED WATER VAPOUR WITH THE HELP OF GPS FOR WEATHER PREDICTION

N. I. Kablak, V. U. Klimyk, I. V. Shvalagin, U. I. Kablak

Estimates of the zenith wet delay which are derived from GPS observational data analysis can be converted into the value of precipitable water vapour. This is important for the climate modelling and weather forecast. For this purpose, the weighted mean temperature of the atmosphere is required. We present some estimates of the precipitable water vapour for GPS observations in Kyiv.