



УДК 528.3

Н. І. Каблук

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ТРОПОСФЕРИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ GNSS-ВИМІРЮВАНЬ У МЕРЕЖІ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦНИХ СТАНЦІЙ

Излагается методика получения информации о пространственно-временном распределении метеопараметров в атмосфере на основании GNSS-данных. Совокупность данных после обработки GNSS-измерений и дополнительной метеорологической информации позволяет получить глобальную модель атмосферы практически в режиме реального времени.

The method of obtaining information about spatial and temporal distribution of the meteoroparameters in the atmosphere on the basis of GNSS data is described. Data set obtained after processing of GNSS measurements and additional meteorological information will allow to receive global model of the atmosphere practically in real time.

Постановка проблеми. Постійні мережі референціальних станцій для фіксування сигналів GNSS-супутників стали надзвичайно важливим інструментарієм для широкого наукового застосування даних. До таких мереж можна віднести глобальну мережу IGS (International GNSS Service), регіональну мережу EPN (EUREF Permanent Network), а також національні мережі референціальних станцій, що працюють у перманентному режимі, мережі активних референціальних станцій, які дозволяють користувачам отримувати свої координати у режимі реального часу (RTK-технології). На території Закарпаття створено першу українську мережу активних референціальних станцій ZAKPOS [<http://www.zakpos.zakgeo.com.ua/>].

Наразі тривають інтенсивні науково-дослідні роботи з визначення та врахування похибок, що впливають на GNSS-спостереження у мережі активних референціальних станцій, зокрема дослідження впливу нижньої частини атмосфери (так званих тропосферних затримок електромагнітного сигналу). В результаті опрацювання даних від космічних апаратів отримують значення тропосферних затримок радіосигналів, що реєструються GNSS-приймачами.

Виникнення затримки сигналу в тропосфері пов'язане з наявністю у ній молекул азоту, кисню, вуглекислого газу і водяної пари. Під дією радіохвиль ці молекули поляризуються і створюють додаткові електричні потоки. Сумарна їх маса відрізняється від струмів у вакуумі. Вони зменшують фазову швидкість радіохвиль, яка залежить від концентрації молекул. Отже, вимірювання додаткової затримки радіоімпульсу при поширенні в тропосфері дають інформацію про інтегральні властивості атмосфери на шляху розповсюдження сигналу.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. Дослідження тропосфери методом GNSS-спостережень спрямовані на глибше вивчення погодних і кліматичних процесів, зрештою, на поліпшення прогнозування погоди [2,4,7,9,10]. Нині найбільшим проектом у Центральній Європі, у рамках якого майже в реальному часі визначаються зеніт-

ні тропосферні затримки в регіональній мережі GNSS-станцій, є E-GVAP (The EUMETNET GPS Water Vapour Programme). Основний обчислювальний центр, що реалізує проект, знаходиться у Королівській обсерваторії Бельгії (ROB) [<http://egvap.dmi.dk>]. Наразі визнано доцільним продовжити дію даного проекту з метою досягнення переходу від регіональних мереж до глобальних і навпаки [4].

Постановка задачі. Основою діяльності гідрометеорологічної служби є функціонування цілісної державної системи спостережень і прогнозування. Це комплексна багаторівнева спостережно-інформаційна система, призначена для проведення систематичних інструментальних спостережень за гідрометеорологічними показниками, станом атмосфери, забрудненням довкілля під впливом природних і антропогенних факторів.

За рівнем технічного й технологічного оснащення вітчизняна гідрометеорологічна служба відстає від потреб сьогодення і значно поступається аналогічним службам багатьох країн світу. Переважна більшість з 25 000 засобів вимірювальної техніки, що використовується службою, розроблена 30-40 років тому, вона морально застаріла і наразі не відповідає сучасним міжнародним стандартам, зокрема вимогам ВМО та Міжнародної організації цивільної авіації. Більше ніж 90 % засобів вимірювальної техніки працюють з наднормативним строком експлуатації, а близько 50 % потребує термінової заміни [www.mns.gov.ua/laws/regulations/pub.../conception_gidromet.doc].

Такий стан технічного і технологічного оснащення гідрометеорологічної служби викликає особливе занепокоєння у зв'язку із зростанням в Україні повторюваності та з посиленням інтенсивності стихійних природних явищ, таких, наприклад, як катастрофічні паводки на річках Закарпаття. Для вивчення цих явищ найкраще підходять супутникові технології отримання інформації. Проте сьогодні в гідрометеорологічній службі вони використовуються недостатньо.

Мережа активних референціальних станцій, що використовують найсучасніші RTK-технології, є централізованою та максимально автоматизованою. Її високотехнологічна інфраструктура допомагає розв'язувати не тільки виробничі геодезичні, а й суто

© Н. І. Каблук, 2013





наукові задачі, що має важливе значення для розвитку всіх наук про Землю.

Основною метою цього дослідження є аналіз можливостей використання потенціалу мережі активних референціальних GNSS-станцій UA-EUPOS/ZAKPOS для розв'язання задач метеорології, а саме для вивчення та дослідження стану атмосфери в режимі реального часу спостережень.

Реальний стан атмосфери залежить від зміни метеопараметрів (тиску, температури та вологості, а отже, парціального тиску) з висотою. Дані про тропосферну затримку сигналів від супутника в даному пункті та її висотний розподіл дають змогу знайти залежності індексу показника заломлення від висоти над пунктом встановлення GNSS-приймача [1,5,6].

Виклад основного матеріалу. Затримка електромагнітного сигналу в тропосфері поділяється на гідростатичну $\delta\rho_d$ та вологу $\delta\rho_w$ складові. Хоча волога складова становить тільки 10 % від значення повної тропосферної затримки, вона є основним погодоформульним фактором і її моделювання є важливим, хоча і непростим завданням. Це пояснюється тим, що зміна парціального тиску водяної пари e носить випадковий характер і може досягати кількох мілібар лише за 10-20 с. Значення параметра h_e , який характеризує висоту, на якій e зменшується в 2,72 рази, змінюються в діапазоні висот від 0,9 до 4,0 км. При значних інверсіях температури h_e досягає максимальних значень на висоті приблизно 4 км. Тому вологість повітря важко змоделювати. А для точного прогнозу погоди необхідна інформація високої якості з таким само просторово-часовим розподілом. Такі умови може забезпечити лише використання даних вимірювань у мережах активних референціальних GNSS-станцій.

Для отримання просторового розподілу тропосферних затримок GNSS-сигналу було розроблено методику визначення їх у будь-якому пункті та на будь-якій висоті у режимі RTK в межах території покриття мережею активних референціальних станцій [5]. Дана методика вперше застосована нами для визначення вертикального розподілу парціального тиску в земній атмосфері.

Як відомо, величину тропосферної затримки одержують з виразу [8]

$$\delta\rho = 10^{-6} \int_H^{H_{\max}} N(h) dh. \quad (1)$$

Аналіз експериментальних значень індексу показника заломлення N переконує, що його залежність від висоти добре апроксимується формулою

$$N(H) = N_0 \exp\left(-\frac{H-H_0}{\bar{H}}\right), \quad (2)$$

де N_0 і \bar{H} є функціями геодезичної довготи L і широти B точки; H_0 – висота пункту, для якої відоме N_0 .

Підставляючи формулу (2) в (1) і обчислюючи інтеграл, отримуємо вираз для визначення тропосферної затримки:

$$\Delta\rho = 10^{-6} N_0 \bar{H} \left[\exp\left(-\frac{H-H_0}{\bar{H}}\right) - \exp\left(-\frac{H_{\max}-H_0}{\bar{H}}\right) \right]. \quad (3)$$

Через великі значення H_{\max} (~ 50 км) "внесок" другого члена $\left[\exp\left(-\frac{H_{\max}-H_0}{\bar{H}}\right) \right]$ у формулі (3) порядку 1-2 мм. Враховуючи це, у формулі (3) другим членом можна знехтувати. Вибравши дані вимірювань активних референціальних GNSS-станцій, які розташовані навколо обраної точки (досліджуваної станції), та позначивши найближчу серед них як опорну, складаємо рівняння:

$$\frac{\delta\rho}{\delta\rho_{\text{оп}}} = \left[1 + c_1(B - B_{\text{оп}}) + c_2(L - L_{\text{оп}}) \right] \exp\left(-\frac{H - H_{\text{оп}}}{c_3}\right). \quad (4)$$

Коефіцієнти c_1 , c_2 , c_3 знаходимо з рівняння (4) за методом найменших квадратів. З урахуванням виразів (1) і (4) отримуємо:

$$N(H) = -10^6 \frac{\partial(\delta\rho)}{\partial H} = \frac{10^6}{c_3} \delta\rho_{\text{оп}} \left[1 + c_1(B - B_{\text{оп}}) + c_2(L - L_{\text{оп}}) \right] \exp\left(-\frac{H - H_{\text{оп}}}{c_3}\right). \quad (5)$$

Індекс показника заломлення може бути виражений через парціальний тиск e , температуру T і тиск атмосферний p :

$$N = K_1 \frac{p-e}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (6)$$

де p – тиск повітря в мілібарах; e – парціальний тиск водяної пари в мілібарах; T – абсолютна температура повітря в градусах Кельвіна; K_1 – коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря в $\text{K}\cdot\text{мбар}^{-1}$; K_2 – коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води, $\text{K}\cdot\text{мбар}^{-1}$; K_3 – коефіцієнт, що відображує вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води в $10^5 \text{K}^2\cdot\text{мбар}^{-1}$.

З виразу (6) випливає, що:

$$e(H) = \frac{T(H)N(H) - K_1 p(H)}{K_2 - K_1 + \frac{K_3}{T(H)}}. \quad (7)$$

Щоб змоделювати залежності температури і тиску від висоти, було використано формули

$$T(H) = T_0 - \gamma(H - H_0); \quad p(H) = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{\gamma R_d}}, \quad (8)$$

де T_0 і p_0 – значення температури і тиску на поверхні; $R_d = 287,054 \text{ м}^2\text{с}^2\text{град}^{-1}$ – газова стала сухого повітря; g_0 – значення прискорення вільного падіння на поверхні (стандартно можна брати $g_0 \approx 9,80616 \text{ м/с}^2$); γ – градієнт температури, який





може змінюватися в залежності від характеру місцевості, пори року, часу доби і т. д. (у стандартній моделі $\gamma=0,0065$ К/м).

Для визначення змін парціального тиску з висотою використано таку модель:

$$e(H) = e_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{4g_0}{\gamma R_d}}, \quad (9)$$

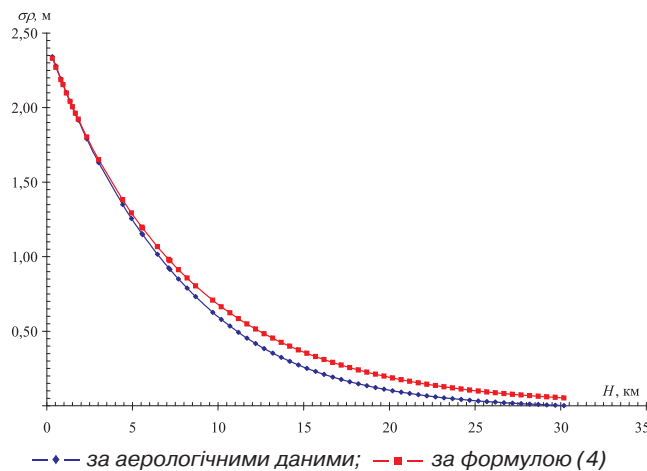
в якій парціальний тиск водяної пари на поверхні землі e_0 обчислювався із значення відносної вологості W_0 , використовуючи формулу Магнуса:

$$e_0 = \frac{6,11W_0}{100} 10^{\frac{7,5(T_0-273,15)}{237,3+T_0-273,15}}. \quad (10)$$

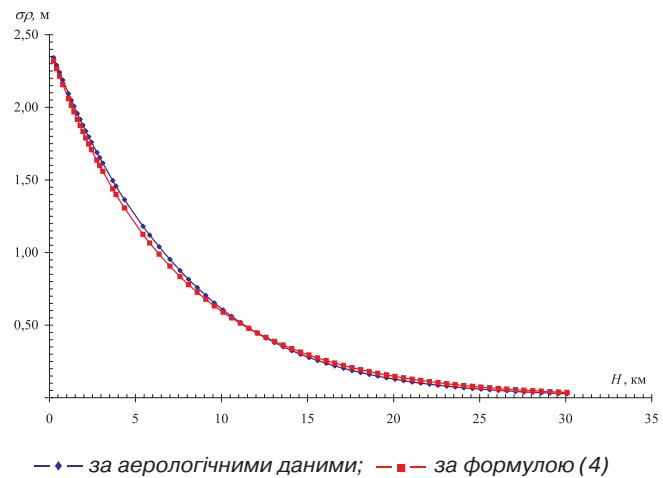
Хід розрахунків. Для обчислення бралися дані аерологічного зондування атмосфери у містах Львові та Чернівцях, а також на ці ж моменти часу – значення тропосферних затримок із GNSS-спостережень на референцних станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS.

Для прикладу на малюнках 1 і 2 відповідно станом на 14.02.2013 р. та 03.03.2013 р. показано залежності тропосферної затримки від висоти над станціями SULP (Львів) та CRNI (Чернівці), розраховані за формулою (4) (червона лінія) і на основі даних аерологічного зондування атмосфери шляхом точного обчислення інтеграла за формулою (1) (синя лінія).

Судячи з вигляду кривих, різні методи дають майже однакові результати: різниці між значеннями тропосферної затримки не перевищують 6 см. Це пояснюється наявністю інверсій температури та вологості, які мають великий вплив на значення тропосферної затримки. Значення $\delta\rho$, розраховані за даними аерологічного зондування в даних пунктах, теж не можна вважати абсолютно точними. Похибка визначення цієї величини в zenіті, яка спричинена похибками вимірювання метеопараметрів, змінюється від 0,006 до 0,012 м [3].



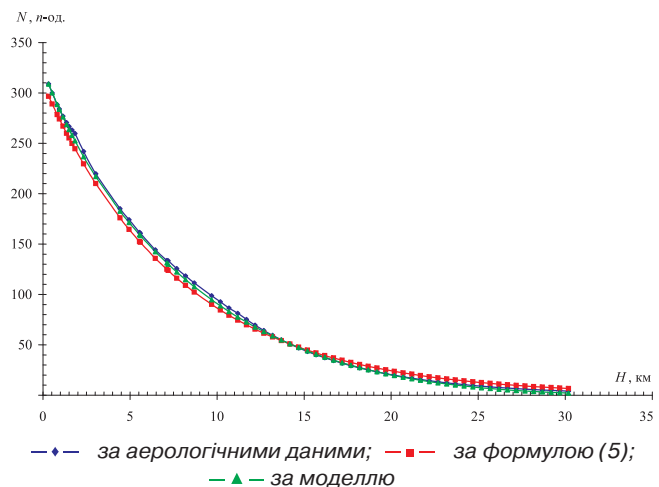
Мал. 1. Графіки залежностей тропосферної затримки від висоти в пункті SULP, зафіксовані під час спостережень 14.02.2013 р.



Мал. 2. Графіки залежностей тропосферної затримки від висоти в пункті CRNI, зафіксовані під час спостережень 03.03.2013 р.

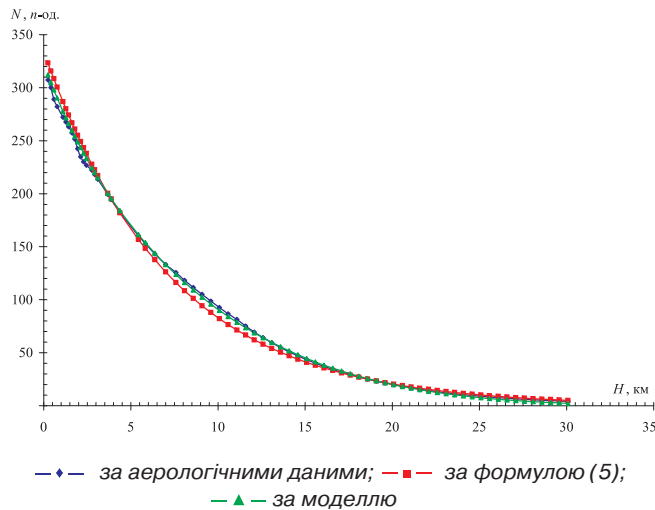
На малюнках 3 і 4 для тих самих дат показано залежності індексу показника заломлення N від висоти H на станціях Львів та Чернівці, розраховані за формулою (5) (червона лінія) та формулою (6) (зелена лінія). Значення температури і тиску обчислювалися, використовуючи вираз (8), парціальний тиск – формули (9 і 10). Температура T_0 , тиск p_0 і відносна вологість W_0 на рівні землі бралися з даних аерологічного зондування атмосфери. Зміну індексу показника заломлення N з висотою над станціями SULP, CRNI було обчислено за формулою (6) (синя лінія). Парціальний тиск розраховувався за формулою Магнуса: $e = \frac{6,11W}{100} 10^{\frac{7,5(T-273,15)}{237,3+T-273,15}}$, а значення температури, тиску і вологості на різних висотах бралися з даних аерологічного зондування атмосфери в пунктах Львів і Чернівці.

Як видно з малюнків 3 і 4, індекси показника заломлення, отримані з формули (5) та модельних формул (6-10), дуже добре кореспондуються



Мал. 3. Графіки залежностей індексу показника заломлення від висоти в пункті SULP станом на 12.02.2013 р.





Мал. 4. Графіки залежностей індексу показника заломлення від висоти в пункті CRNI станом на 03.03.2013 р.

з експериментальними даними. Похибка за формулою (5) становить не більше 18, а за формулою (6) – не більше 11 n -одиниць, що дає відносну похибку не більше 10 % і 5 % відповідно.

Якщо значення тиску p_0 й температури T_0 на поверхні землі відомі, то для визначення парціального тиску e можливі два варіанти:

1) залежність $\delta\rho$ від висоти атмосфери H визначається за формулою (4), а зміну індексу показника заломлення з висотою в атмосфері $N(H)$ та зміну парціального тиску з висотою в атмосфері $e(H)$ знаходимо відповідно за формулами (5, 7 і 8);

2) обчислюючи інтеграл у рівнянні (1) підставленням рівняння (6) і враховуючи залежності (8) і (9) та відому при $H=H_{\text{оп}}$ тропосферну затримку $\delta\rho_{\text{оп}}$, отримуємо трансцендентне рівняння відносно e_0 (9). Крім того, розв'язуючи це рівняння, визначаємо також залежність парціального тиску від висоти.

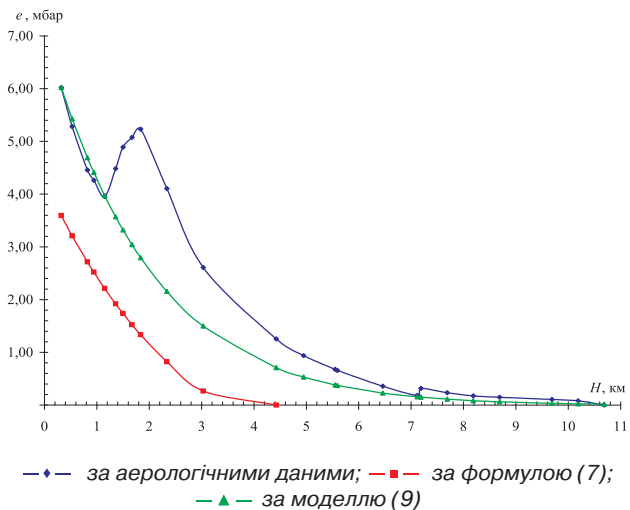
На малюнках 5 і 6 для 14.02 та 03.03.2013 р. показано залежність парціального тиску від висоти над станціями SULP, CRNI, розраховану за формулами (7) (червона лінія), (9) (зелена лінія) і формулою Магнуса, використовуючи для цього експериментальні радіозондові дані про температуру T й відносну вологість W (синя лінія).

У розрахунки бралися результати аерологічних зондувань у пунктах Львів на 14.02.2013 р., Чернівці на 03.03.2013 р. та значення тропосферних затримок на референціальних станціях на ці ж дати.

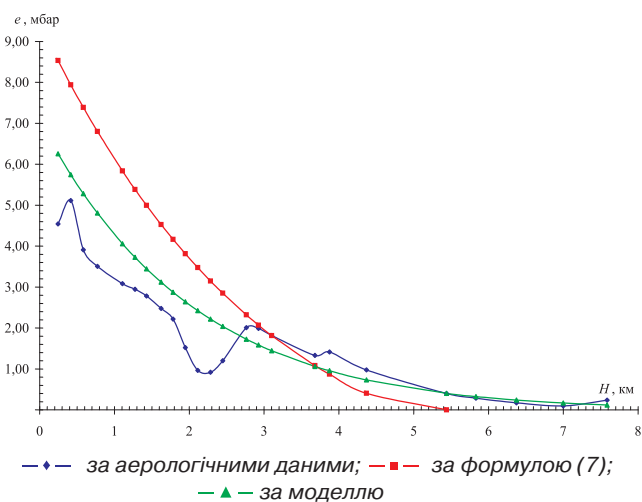
Як бачимо, результати обчислень за формулою (7) добре узгоджуються з експериментальними даними.

Використовуючи висотний хід зміни індексу показника заломлення, можна отримати інформацію про вертикальний розподіл випадної водяної пари в атмосфері [4].

Поєднання даних оброблення GNSS-вимірювань та додаткової метеорологічної інформації дасть можливість отримати модель атмосфери практично в режимі реального часу і проводити моніторинг стану атмосфери.



Мал. 5. Графіки залежностей парціального тиску від висоти в пункті SULP станом на 12.02.2013 р.



Мал. 6. Графіки залежностей парціального тиску від висоти в пункті CRNI станом на 03.03.2013 р.

Висновки. Результати виконаних досліджень вказують на те, що розроблена методика дає змогу визначати тропосферні затримки у будь-якому пункті в межах території покриття мережею активних референціальних станцій у режимі реального часу спостережень з точністю до 5-6 см без врахування метеопараметрів на поверхні землі.

Цей метод обчислення індексів показника заломлення без використання значень метеопараметрів на поверхні можна використовувати в будь-якому пункті на території мережі UA-EUPOS/ZAKPOS в RTK-режимі. Оцінювання точності методу, проведене з використанням даних аерологічних зондувань атмосфери в пунктах Львів та Чернівці, показало, що він дає майже таку саму точність, як і стандартна модель з урахуванням цих параметрів. Запропоновано також метод обчислення парціального тиску на поверхні землі з використанням значень отриманих тропосферних затримок та значень тиску і температури.

Методика отримання інформації про просторовий





розподіл метеопараметрів в атмосфері за даними реєстрації GNSS-сигналів дасть змогу вийти на якісно новий рівень метеорологічного забезпечення, підвищити якість прогнозів погоди.

Література

1. Азизов, А.А. Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы / А.А. Азизов, К.П. Гайкович, С.С. Кашкарев, М.Б. Черняева // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1997. – Т. ХLI. – № 9. – С. 1093-1110.
2. Заблоцький, Ф. Суха і гідростатична складові зенітної тропосферної затримки / Ф. Заблоцький, Б. Паляниця, Л. Матвієнко, Н. Турчин // Сучас. досягн. геодез. науки та вир-ва: зб. наук. пр. Зах. геодез. т-ва УТГК. – Л.: Вид-во Львівської політехніки, 2011. – Вип. II. – С. 92-95.
3. Каблак, Н.І. Сучасні підходи до визначення та використання тропосферних затримок / Н.І. Каблак // Геодез., картогр. і аерофотознім. – 2009. – Вип. 72. – С. 22-27.
4. Каблак, Н.І. Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНС-даних / Н.І. Каблак // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17. – № 4. – С. 65-73.
5. Каблак, Н.І. Методика визначення впливу тропосфери на результати GNSS-вимірювань у мережі активних референціальних станцій / Н.І. Каблак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук.

пр. Зах. геодез. т-ва УТГК. – Л.: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – Вип. I. – С. 62-66.

6. Хуторова, О.Г. О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS – ГЛОНАСС / О.Г. Хуторова, А.А. Васильев, В.Е. Хуторов // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – 23. – № 6. – С. 510-514.

7. Devis, M.S. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System / M.S. Devis, S. Businger, T.A. Herring [et al.] // J. Geophys. – 1992. – V. 97. – P. 15787-15801.

8. Mendes, V.B. Tropospheric Zenith Delay Prediction Accuracy for Airborne GPS High-Precision Positioning / V.B. Mendes, R.B. Langley // Proceedings of The Institute of Navigation 54th Annual Meeting. – Denver, CO, U.S.A., 1-3 June 1998. – P. 337-347.

9. Schueler, T. A New Tropospheric Correction Model for GNSS Navigation Proceedings of GNSS / T. Schueler, G.W. Hein, B. Eissfeller // V GNSS International Symposium, Spanish Institute of Navigation. – Seville, Spain, May 8-11, 2001.

Інтернет-джерело

10. Schueler, T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation Dissertation / T. Schueler. – Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, February 2001, online: <http://137.193.32.1/Forschung/TropAC/docs/phd/index.html>.

Надійшла 17.04.13

* * *

УДК 528.335

М. Т. Ковтун

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ПРИЙОМІВ І ТОЧНОСТІ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ НА КОРОТКИХ ВІДСТАНЯХ

Описывается процесс выведения формулы для определения количества приемов измерения угла электронным тахеометром на коротких расстояниях (10-50 м). Особое внимание уделено вопросу точности определения с одного приема средней квадратической погрешности измерений.

The paper presents the process of derivation of a formula to determine the number of steps by angle measurement by means of electronic tachometer on short distances (10-50 m). The particular attention was paid to the accuracy of the determination with one reception of mean square error.

Постановка задачі. Під час кутових вимірювань на коротких відстанях (10-50 м) виникає необхідність у встановленні математичного зв'язку між окремими параметрами, що дало б можливість визначати кількість виконання прийомів на станції. Такими параметрами є:

- середня квадратична похибка (СКП) m вимірювання кута одним прийомом конкретним приладом на коротких відстанях;
- відстані S_1 та S_2 від точки стояння до точок спостережень (див. малюнок);
- похибки x_1 та x_2 встановлення (центрування)

© М. Т. Ковтун, 2013

візирних марок або точніших приладів на пунктах візування, наприклад, комплект електронного тахеометра TC 1800 Leica;

- коефіцієнт z_p довірчого інтервалу СКП арифметичної середини M ;

- кількість n прийомів вимірювання кута β .

Потрібно знайти математичну залежність між указаними параметрами.

Аналіз попередніх публікацій. Питанню вимірювання кутів на коротких відстанях в інженерній геодезії приділено ще недостатньо уваги. У праці [2] описується прийом використання одностороннього довірчого інтервалу при розрахунку точності вимірювань – це формула (VI.58).

