

УДК 528.2/3

А. ХОПТАР

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. 093-11-07-822, ел. пошта alina.a.khoptar@lpnu.ua

ВІДНОВЛЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ВМІСТУ ВОДЯНОЇ ПАРИ В ТРОПОСФЕРІ ЗЕМЛІ НА ОСНОВІ ДАНИХ МУЛЬТИ-GNSS СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Розподіл вмісту водяної пари можна встановити за допомогою даних спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) методом GNSS-томографії, що уможливило вивчення змін вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі. Однак у разі спостережень за допомогою лише однієї системи GPS через обмежену кількість супутників результати томографії вмісту водяної пари характеризуються великою невизначеністю. Модернізація американської GPS (Global Positioning System), відновлення російської ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), а також становлення нових сузір'їв навігаційних супутників, таких як європейська система Galileo та китайська система BDS (ВeiDou Navigation Satellite System), істотно покращили геометричний розподіл сигналів супутників, що може підвищити ефективність GNSS-томографії вмісту водяної пари за рахунок комбінування даних мульти-GNSS. **Мета** цієї роботи – відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі на основі результатів опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом на прикладі GNSS-станції GANP (Попрад, Словаччина). **Методика.** Запропоновано методику відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі методом GNSS-томографії на основі даних мульти-GNSS спостережень однієї станції PPP-методом. Методику протестовано на реальних даних та симульованих (синтетичних даних). **Результати.** Наведено результати дослідження висотного розподілу вмісту водяної пари на прикладі GNSS-станції GANP на основі даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом. Для перевірки результатів здійснено порівняння з відповідними даними радіозондування атмосфери аерологічної станції Poprad-Ganovce (Попрад, Словаччина), яке показало, що різниці коливаються на міліметровому рівні точності. **Наукова новизна та практична значущість.** Вперше запропоновано підхід відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі на основі даних мульти-GNSS спостережень лише однієї станції. Результати дослідження вирішують важливу науково-прикладну проблему методології відновлення метеорологічних величин у тропосфері Землі на підставі даних мульти-GNSS спостережень методом GNSS-томографії.

Ключові слова: Глобальні навігаційні супутникові системи (Global Navigation Satellite Systems, GNSS); мульти-GNSS; абсолютний метод точного позиціонування (Precise Point Positioning, PPP); GNSS-томографія.

Вступ

Вміст та розподіл водяної пари в атмосфері Землі пов'язані з різними погодними та кліматичними змінами, тому мають важливе значення для розуміння багатьох метеорологічних явищ. Із швидким розвитком глобальних навігаційних супутникових систем (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) GNSS-томографія тропосфери перетворилася на потенційно потужний метод визначення розподілу тропосферних параметрів із високою просторово-часовою роздільною здатністю. Вперше ідея GNSS-томографії тропосфери була запропонована [Bevis et al., 1992], а перший експеримент проведено [Flores et al., 2000a]. Після цього було виконано багато експериментів у різних регіонах задля демонстрації потенціалу GNSS-томографії.

Найвідоміші дослідження, які посприяли істотному поступу в цьому напрямі, такі:

– Розроблення програми LOTTOS (Local Tropospheric Tomographic Software) [Flores, 1999]. Як вхідні дані використано значення похилих тропосферних затримок, отриманих у результаті опрацювання даних GNSS-спостережень у пакеті програмного забезпечення GIPSY-OASIS PPP-методом. Крім того, в системі регулювання введено кілька обмежень. Надалі було здійснено різні симуляції та порівняння реальних даних [Flores et al., 2000a, Flores et al., 2000b].

– Другий підхід реалізовано в межах проекту GPS-метеорології в Японії [Hirahara, 2000]. Головною його метою був моніторинг швидких змін водяної пари задля прогнозування азійських мусонів та інших атмосферних турбулентностей. Значення вологості

складової похилих тропосферних затримок, отримані в результаті опрацювання даних GNSS-спостережень у пакеті програмного забезпечення GAMIT/GLOBK, були використані спільно із даними інших вимірювань, такими як вітрові профілі радіозондів та дані радіометра.

– Третій підхід використовував результати опрацювання даних GNSS-спостережень у пакеті програмного забезпечення Bernese GPS Software. На підставі результатів опрацювання було розроблено першу версію програми AWATOS (Atmospheric Water Vapor Tomography) [Kruse, 2001].

Зважаючи на дані досліджень, основною проблемою під час реалізації GNSS-томографії є геометрія області досліджень, що пов'язано з геометрією мереж використовуваних GNSS-станцій та доступних у певний момент часу GNSS-спутників. Всі сучасні томографічні проекти потребують наявності щільної мережі GNSS-приймачів [Zhao et al., 2017; Pincus et al., 2017; Möller, Landskron, 2019]. Зауважимо: автори роботи [Bender, 2011] показали, що незначних покращень можна очікувати, поєднуючи GNSS-спостереження систем GPS, GLONASS та Galileo, особливо нижньої тропосфери. З того часу здійснено ґрунтовні технічні оновлення та вдосконалення системи мульти-GNSS та абсолютного методу точного позиціонування (Precise Point Positioning, PPP) [Savchuk et al., 2019]. Тому необхідно застосовувати ці переваги для реалізації GNSS-томографії з метою просторової реконструкції параметрів тропосфери. На відміну від вищезгаданих публікацій, пропонуємо методику відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі методом GNSS-томографії на основі результатів опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом, коли область дослідження обмежується лише однією станцією. Завдяки цьому замість великої кількості приймачів у мережі можна використовувати один, а кількість вхідної інформації для GNSS-томографії тропосфери збільшиться за рахунок використання сигналів від всіх наявних супутників мульти-GNSS.

Мета

Метою цієї роботи є відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі на основі результатів опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом на прикладі GNSS-станції GANP.

Методика

Використання даних мульти-GNSS для дослідження вертикального розподілу вмісту водяної пари в тропосфері Землі дає можливість одночасно спосте-

рігати на небесній сфері велику кількість джерел сигналу, що дає змогу дистанційно зондувати різні ділянки тропосфери під різними кутами нахилу супутників. GNSS-сигнал, який передає супутник, проходить через шари і реєструється наземним приймачем. Для правильного застосування методу GNSS-томографії потрібна велика кількість сигналів, що проходять через тропосферу. У кращому випадку необхідне принаймні одне вимірювання у кожному шарі. Отже, GNSS-сигнали можуть бути використані для побудови системи рівнянь спостережень під час моделювання GNSS-томографії.

Розв'язання оберненої задачі відновлення вертикального розподілу вмісту водяної пари тропосфери Землі методом GNSS-томографії зводиться до розв'язання системи інтегральних рівнянь відносно висотного профілю. Узагальнена модель має такий вигляд:

$$Ax = L, \quad (1)$$

де L – вектор, що представляє GNSS-спостереження, x – миттєвий стан вмісту водяної пари у кожному шарі, а A – основна матриця системи. Тут параметр x є шуканим вектором стану, а L – спостережувана величина, яку отримують вимірювальними приладами.

Зазвичай для GNSS-томографії тропосфери вхідною інформацією є два типи параметрів, отриманих за результатами GNSS-спостережень:

– значення вологої складової похилої тропосферної затримки (Slant Wet Delay, SWD), які використовують для отримання значень вологості атмосфери;

– значення вмісту водяної пари у похилому напрямку (Slant Water Vapor, S_{wv}), які можна використати для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі.

Обидва типи параметрів можуть бути взаємозамінними. У нашому випадку як вхідну інформацію використано файли тропосферних параметрів, отриманих у результаті опрацювання даних мульти-GNSS спостережень у пакеті програмного забезпечення GipsyX.

Значення S_{wv} можна виразити так [Flores et al., 2000a]:

$$S_{wv} = 10^{-6} \cdot \int \rho(s) ds, \quad (2)$$

де $\rho(s)$ – значення густини водяної пари, ds – дискретизована відстань у напрямку поширення сигналу від супутника до приймача.

Оскільки для проведення цього дослідження використано дані лише однієї GNSS-станції, то вважаємо можливим застосування плоских прямокутних

координат. Ця можливість обґрунтована тим, що якщо обмежити область GNSS-томографії лише чотирма супутниками за низьких кутів нахилу, задля визначення максимально можливих крайніх точок, то довжини сторін отриманого чотирикутника у останньому шарі дорівнюватимуть 150, 102, 119 та 136 км, а площа становитиме 82215 км².

Для кожного визначеного шару вводиться горизонтальна параметризована функція для опису безперервних змін вмісту водяної пари в просторі, а густина водяної пари для кожного шару замінюється значенням у центрі шару. Густина водяної пари в центрі кожного вертикального шару можна виразити так:

$$\rho_{wv} = f(x, y) = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y, \quad (3)$$

де a_1, \dots, a_3 – коефіцієнти функції густини водяної пари, які оцінюють та оновлюють під час кожного томографічного розв’язання, x і y – координати перетину сигнального променя і центра вибраного шару відповідно.

Для зручності початок координат переноситься у точку координат GNSS-станції експериментальних досліджень. Тоді рівняння (3) набуде такого вигляду:

$$\rho_{wv} = a_1 + a_2 \cdot \Delta x + a_3 \cdot \Delta y. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{wv}^{S_1} = 10^{-6} (a_{11} + a_{12} \Delta x_1^{S_1} + a_{13} \Delta y_1^{S_1}) d_1^{S_1} + \dots + \\ + 10^{-6} (a_{n1} + a_{n2} \Delta x_n^{S_1} + a_{n3} \Delta y_n^{S_1}) d_n^{S_1} \quad \dots \\ S_{wv}^{S_m} = 10^{-6} (a_{11} + a_{12} \Delta x_1^{S_m} + a_{13} \Delta y_1^{S_m}) d_1^{S_m} + \dots + \\ + 10^{-6} (a_{n1} + a_{n2} \Delta x_n^{S_m} + a_{n3} \Delta y_n^{S_m}) d_n^{S_m}, \end{array} \right. \quad (8)$$

За рахунок збільшення кількості супутників із використанням даних мульти-GNSS спостережень уможливується однозначне визначення всіх невідомих, оскільки ми можемо побудувати систему рівнянь, кількість невідомих у якій дорівнює кількості рівнянь. Маючи всі елементи системи рівнянь (8), можемо звести її до вигляду (1), де L – вектор значень вмісту водяної пари в тропосфері у нахиленому напрямку для кожного супутника GNSS-спостережень, x – шукані коефіцієнти, а A – основна матриця системи, елементами якої є співвідношення координат центра шару і відстані, пройдені GNSS-сигналом у відповідному шарі. Після знаходження коефіцієнтів a_{11}, \dots, a_{n3} знаходимо значення S_{wv} в центрі кожного шару. Вводячи горизонтальну параметризовану функцію, густину водяної пари в будь-якому місці можемо обчислити за допомогою встановленої функції.

Результати

Для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі методом GNSS-томографії тропосфери використано результати опрацювання даних мульти-GNSS спостережень із чоти-

Тоді значення S_{wv} для i -го шару можна отримати як:

$$S_{wv_i} = \rho_i \cdot d_i = f(\Delta x_i, \Delta y_i) \cdot d_i, \quad (5)$$

де d_i – відстань супутникового сигналу, пройденого в i -му шарі.

Рівняння (2) можна замінити таким виразом на основі рівняння (5):

$$S_{wv} = S_{wv_1} + S_{wv_2} + \dots + S_{wv_n} = 10^{-6} \cdot \left(\int_{h_0}^{h_1} \rho_1 ds + \int_{h_1}^{h_2} \rho_2 ds + \dots + \int_{h_{n-1}}^{h_n} \rho_n ds \right), \quad (6)$$

де h_{n-1} і h_n – висоти крайніх точок відповідного шару.

Якщо, наприклад, вибрати n шарів за принципом меншого інтервалу в нижніх шарах та більшого інтервалу у вищих шарах, то нове рівняння такого підходу виглядатиме так:

$$S_{wv} = S_{wv1} + \dots + S_{wvn} = f_1 \cdot d_1 + \dots + f_n \cdot d_n = 10^{-6} (a_{11} + a_{12} \Delta x_1 + a_{13} \Delta y_1) d_1 + \dots + 10^{-6} (a_{n1} + a_{n2} \Delta x_n + a_{n3} \Delta y_n) d_n \quad (7)$$

Отже, система рівнянь умовно матиме вигляд:

рьох сузір’їв – GPS, ГЛОНАСС, Galileo і BDS – для однієї станції проекту MGEX – GANP у період з 13.08.2017 р. до 17.06.2020 р. Такий період опрацювання був зумовлений, насамперед, початком роботи цієї станції у режимі мульти-GNSS, а отже – наявністю IGS MGEX-продуктів від CODE, а також відповідних файлів мульти-GNSS спостережень у форматі RINEX 3 версії.

Дані мульти-GNSS спостережень опрацьовано в пакеті програмного забезпечення GipsyX версії 1.1 PPP-методом. Розробником і власником цього програмного продукту є Лабораторія реактивного руху (Jet Propulsion Laboratory, JPL) Каліфорнійського технічного інституту. Кафедра вищої геодезії та астрономії у 2018 р. отримала некомерційну ліцензію на використання GipsyX для проведення наукових досліджень. Детальний опис алгоритму опрацювання в GipsyX PPP-методом можна знайти в [Savchuk et al., 2019; Savchuk et al., 2020].

Завдяки збільшенню кількості супутників зі становленням мульти-GNSS збільшується достовірність визначення зенітних тропосферних затримок, що дає

змогу розв'язати обернену задачу визначення похилих тропосферних затримок для випадків, коли супутникових сигналів недостатньо чи конфігурація супутників нерівномірна, що суттєво впливає на результати GNSS-томографії.

Отже, для визначення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі методом GNSS-томографії для прикладу виділено два варіанти розташування супутників. Перший варіант відображає реальне розташування GNSS-супутників на вибраний момент часу (рис. 1), а другий варіант – рівномірне їх розподілення на небесній сфері (рис. 2).

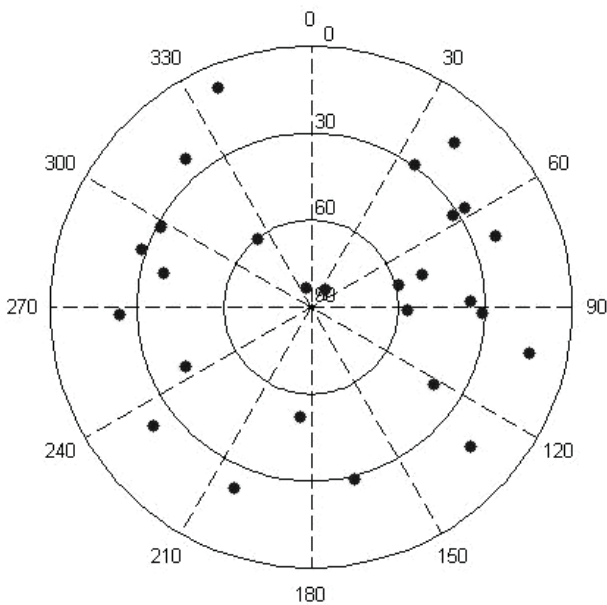


Рис. 1. Реальне розташування GNSS-супутників 01.06.2020 р. о 00^h 05^m

Fig. 1. Real location of GNSS satellites on 01.06.2020, 00^h 05^m

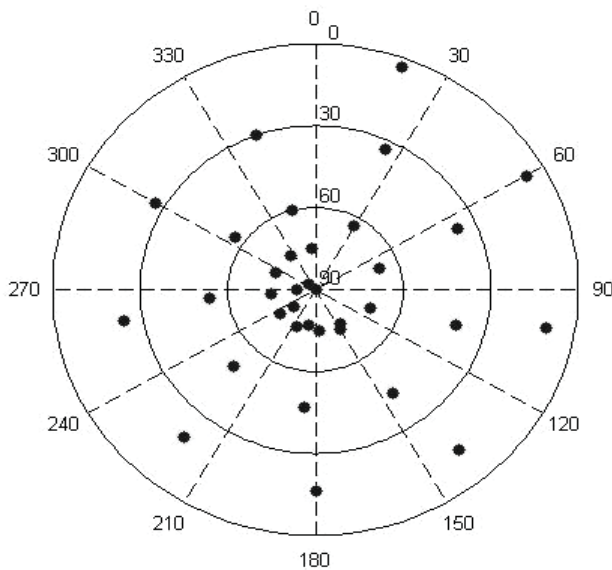


Рис. 2. Симульоване розташування GNSS-супутників

Fig. 2. Simulation location of GNSS satellites

Як зазначено вище, спостережувані дані опрацьовано за допомогою GipsyX PPP-методом, що дало змогу отримати параметри тропосфери – значення зенітних тропосферних затримок (Zenith Total Delay, ZTD) та тропосферних градієнтів G_N і G_E .

Наступним кроком було визначення вологої складової похилих тропосферних затримок (Slant Water Delay, SWD), які пізніше використовували для отримання відповідних значень S_{wv} у напрямку поширення сигналу кожного супутника. Для одержання значень S_{wv} використані емпірична функція відображення GMF [Boehm et al., 2006] та глобальна модель тиску та температури GPT2 [Lagler et al., 2013].

Область GNSS-томографії тропосфери умовно розділили на дев'ять шарів до висоти 10600 м над землею поверхнею (рис. 3).

Границі області GNSS-томографії характеризуються такими особливостями:

- в плані вибрані за крайньою точкою поширення сигналу GNSS-супутника, що був розташований з найменшим кутом нахилу у відповідному варіанті;
- по висоті вибрано нерівномірно: 250 м, 450 м, 500 м, 600 м, 800 м, 1100 м, 1600 м, 2300 м, 3000 м знизу догори відповідно. Такий поділ пояснюється тим, що в нижніх шарах тропосфери міститься більшість водяної пари.

Оскільки процес реалізації GNSS-томографії тропосфери охоплює великий набір даних та обчислювальних маніпуляцій, в середовищі програмування Dev-C++ ми розробили програму *TWVT.exe*. Основний функціонал програми передбачає:

1. Процес обчислення тропосферних параметрів:

- завантаження файла *.tdp з результатами опрацювання даних мульти-GNSS спостережень в GipsyX (значення ZTD , G_N і G_E);
- вибір необхідного моменту для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в межах часу спостережень завантаженого файла *.tdp;
- вибір параметрів моделей GPT2 та VMF3 відповідно до заданого моменту часу та вибраної області дослідження.

2. Завантаження файла *.sat з інформацією про розташування GNSS-супутників – реальні або симульовані дані (кути нахилу та азимуту супутників).

3. Розрахунок інтегральних значень вмісту водяної пари для кожного супутника S_{wv} .

4. Обчислення параметрів шарів (координати центральної точки GNSS-сигналу та довжини його проходження у відповідному шарі) для кожного супутника.

5. Побудова та розв’язання системи рівнянь GNSS-томографії:

- побудова системи рівнянь у вигляді (8);
- формування матриць A та L ;
- розв’язання побудованої системи рівнянь – отримання матриці x , тобто коефіцієнтів за шарами;
- обчислення значень S_{wv} у кожному шарі.

Отже, в результаті реалізації GNSS-томографії обчислено значення вмісту водяної пари S_{wv} у точках перетину сигналів GNSS-супутників із центром кожного шару.

Для візуалізації результатів запропонованої методики на рис. 4–5 наведено графіки розподілу вмісту водяної пари в кожному шарі GNSS-томографії тропосфери за двома варіантами. На цих графіках поглиблення градації синього кольору відображає зменшення кількості водяної пари в області дослідження, чорний – значення, близькі до нуля. З графіків бачимо, що вміст водяної пари в нижніх шарах GNSS-томографії тропосфери набуває найбільших значень, а зі збільшенням висоти зменшується. Проте у шостому та сьомому шарах ці значення починають різко зростати, а з восьмого шару показники повертаються до значень, наближених до п’ятого шару. У дев’ятому шарі значення вмісту водяної пари близькі до нульових. Отримані

результати демонструють реальний характер розподілу водяної пари. Це дає підстави стверджувати, що запропонована методика реалізації GNSS-томографії тропосфери може надати достовірну інформацію про вертикальний розподіл вмісту водяної пари.

Для перевірки запропонованої методики відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі методом GNSS-томографії тропосфери використано дані радіозондування із відповідної аерологічної станції Poprad-Ganovce, оскільки радіозондування – єдиний підхід безпосереднього отримання вертикальних профілів атмосферних параметрів.

Дані радіозондування атмосфери завантажено з інтернет-ресурсу Служби атмосферних досліджень Університету Вайомінга (США) [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>]. На основі цих даних виконано обчислення вмісту водяної пари інтегральним методом. Результат перевірки за двома варіантами (1 – реальні дані, 2 – симульовані дані) відображено на рис. 6. З рис. 6 видно, що значення вмісту водяної пари, отримані за першим і другим варіантами, досить близькі до результатів, одержаних за даними радіозондування.

Очевидно, синя лінія більш узгоджена із чорною, ніж червона, тобто результати за другим варіантом краще відповідають радіозондуванню.

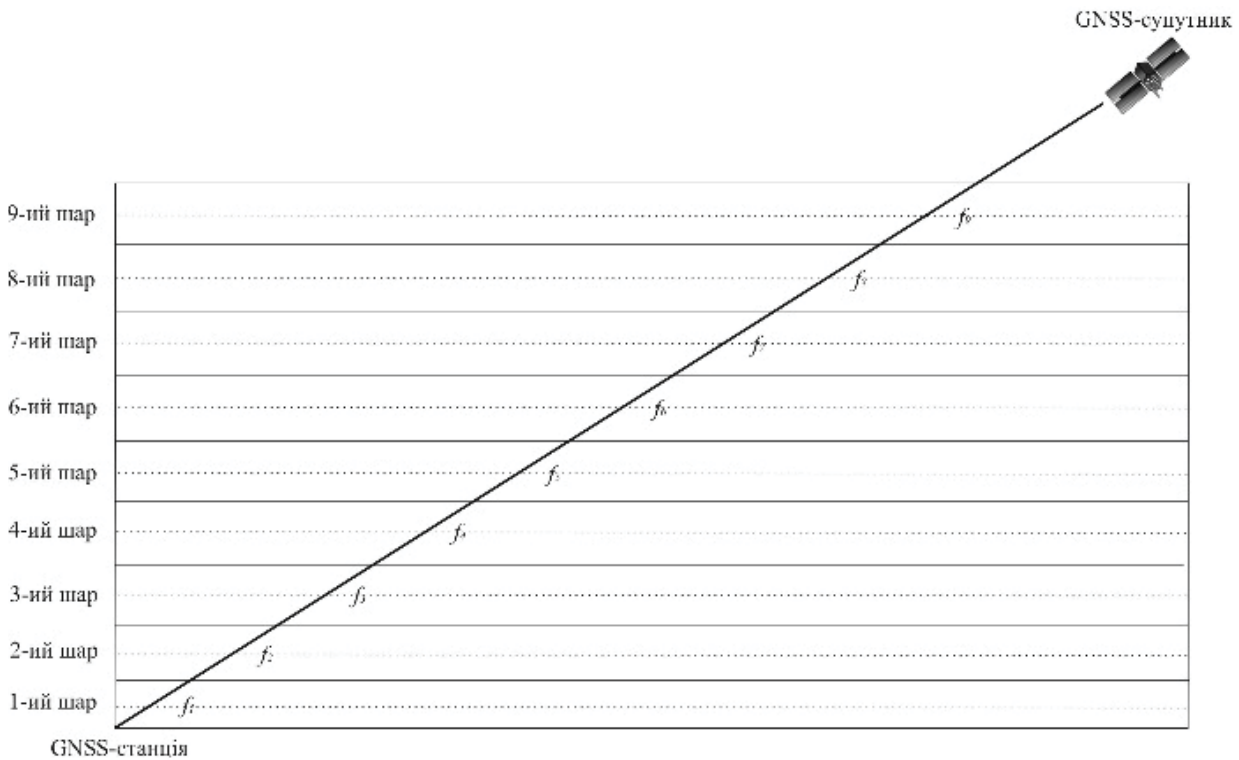


Рис. 3. Принципова схема GNSS-томографії тропосфери

Fig. 3. Schematic diagram of GNSS-tomography of the troposphere

Наукова новизна і практична значущість

Вперше запропоновано підхід відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі на основі даних мульти-GNSS спостережень лише однієї станції. За результатами опрацювання цей підхід реалізовано на реальних та симульованих даних (які ми підібрали штучно) для отримання надійніших результатів. Таке застосування симуляції розташування GNSS-супутників

може ефективно доповнити ситуацію у випадку, коли недостатня кількість сигнальних променів навколо GNSS-станції. Результати проведеного дослідження вирішують важливу науково-прикладну проблему методології відновлення метеорологічних величин в тропосфері Землі на основі даних мульти-GNSS спостережень методом GNSS-томографії. Отримані результати мають важливе значення для геодезії та метеорології.

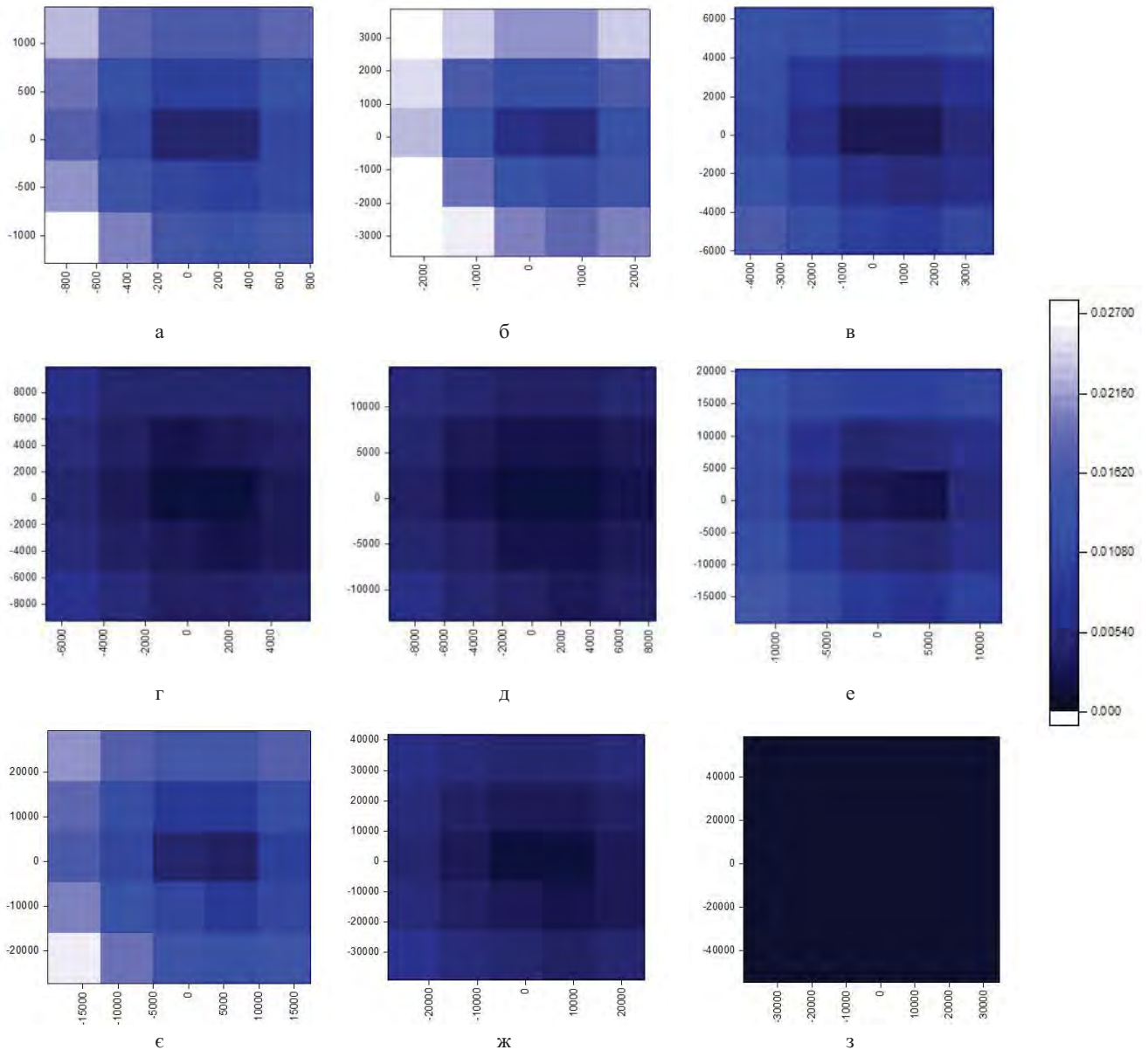


Рис. 4. Візуалізація результатів реалізації GNSS-томографії тропосфери за першим варіантом:

а – 1-й шар; б – 2-й шар; в – 3-й шар; г – 4-й шар; д – 5-й шар;

е – 6-й шар; є – 7-й шар; ж – 8-й шар; з – 9-й шар

Fig. 4. Visualization of the results of GNSS-tomography of the troposphere by 1st option:

a – 1 layer; б – 2 layer; в – 3 layer; г – 4 layer; д – 5 layer; е – 6 layer;

є – 7 layer; ж – 8 layer; з – 9 layer

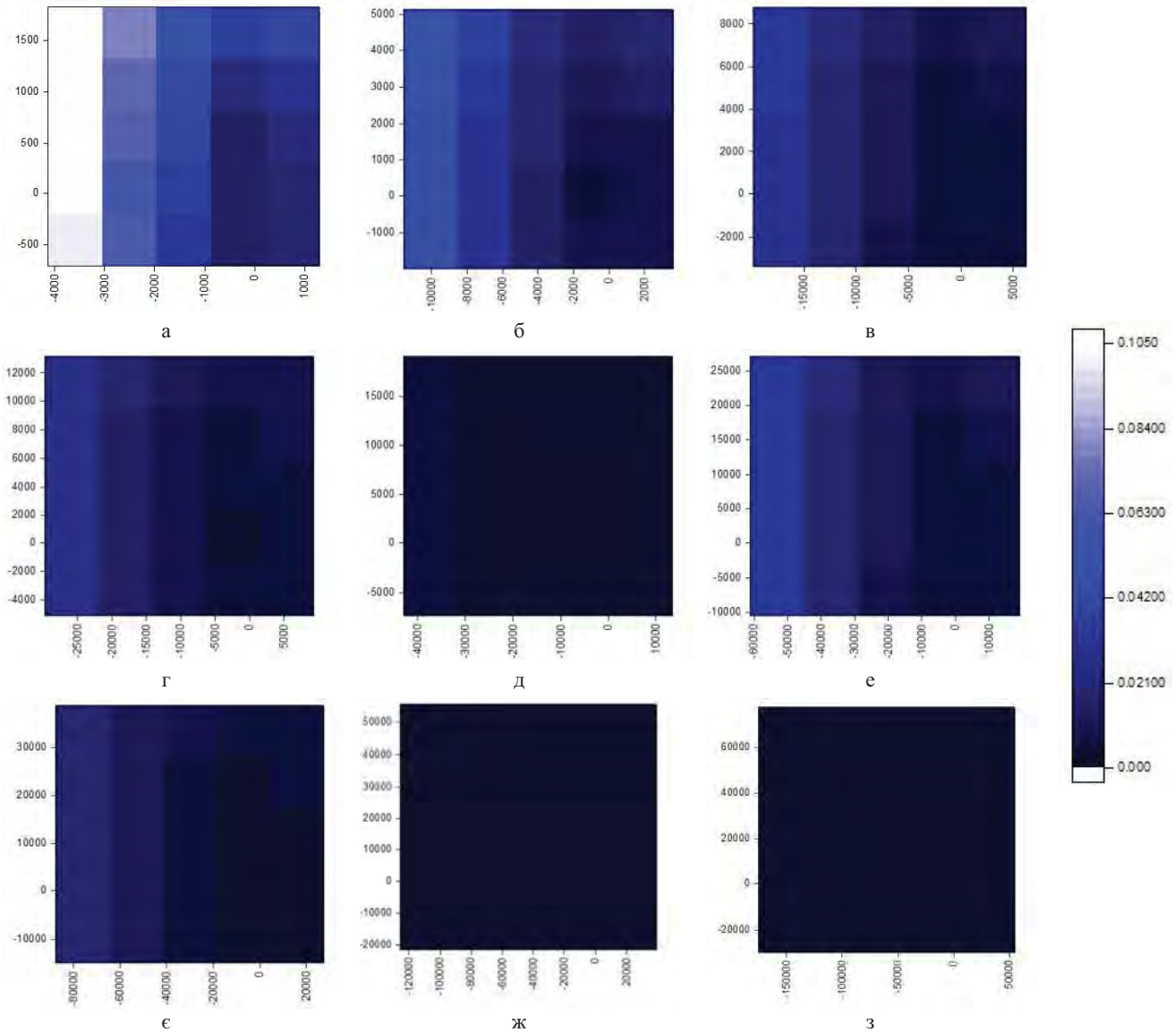


Рис. 5. Візуалізація результатів реалізації GNSS-томографії тропосфери за другим варіантом: а – 1-й шар; б – 2-й шар; в – 3-й шар; г – 4-й шар; д – 5-й шар; е – 6-й шар; є – 7-й шар; ж – 8-й шар; з – 9-й шар

Fig. 5. Visualization of the results of GNSS-tomography of the troposphere by 2nd option: а – 1 layer; б – 2 layer; в – 3 layer; г – 4 layer; д – 5 layer; е – 6 layer; є – 7 layer; ж – 8 layer; з – 9 layer

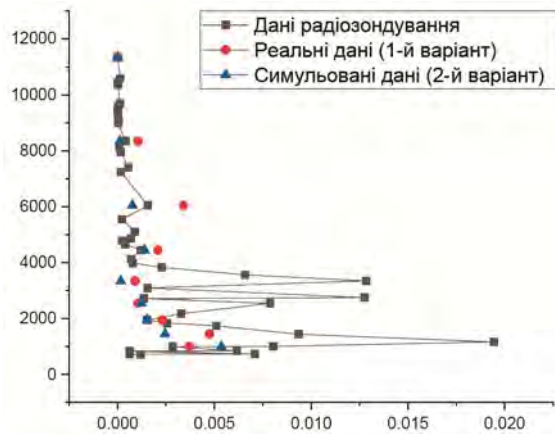


Рис. 6. Вертикальні профілі вмісту водяної пари

Fig. 6. Vertical profiles of water vapor content

Висновки

Розглянуто підхід до розширення методичних можливостей відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі. В межах дослідження розроблено та реалізовано методику відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі методом GNSS-томографії за результатами обчислених тропосферних параметрів на прикладі GNSS-станції GANP на основі даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом. Переваги запропонованої методики такі: уникнення накладення емпіричних обмежень на модель GNSS-томографії тропосфери, що забезпечує точність результату; використання даних лише однієї GNSS-станції, що підвищує стабільність моделі GNSS-томографії тропосфери.

Досліджено точність результатів відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі на основі опрацювання даних мульти-GNSS спостережень на GNSS-станції GANP за допомогою порівняння їх з даними вертикальних профілів радіозондування на відповідній аерологічній станції Poprad-Ganovce. Встановлено, що різниці коливаються на міліметровому рівні точності. Значення вмісту водяної пари за запропонованою методикою доволі близькі до результатів, отриманих за даними радіозондування.

Література

- Bender M., Dick G., Ge M., Deng Z., Wickert J., Kahle H.G., Tetzlaff G. (2011). Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Advances in Space Research*, 47(10), pp. 1704–1720.
- Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapour using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), pp. 15787–15801.
- Boehm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Flores A. (1999). Atmospheric tomography using satellite radio signal: Ph. D. Dis. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Flores A., Ruffini, G., Rius, A. (2000a). 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays. *Annales Geophysicae*, 18(2), pp. 223–234
- Flores A., Gradinarsky L. P., Elosegui P., Elgered G., Davis J. L., Rius A. (2000b). Sensing atmospheric structure: tropospheric tomographic results of the small-scale GPS campaign at the Onsala space observatory. *Earth, planets and space*, 52(11), pp. 941–945.
- Hirahara K. (2000). Local GPS tropospheric tomography, *Earth, planets and space*, 52(11), pp. 935–939.
- Kruse L. P. (2001). Spatial and temporal distribution of atmospheric water vapor using space geodetic techniques. Doctoral dissertation, ETH Zurich.
- Lagler K., Schindelegger M., Böhm J., Krásná H., Nilsson T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical research letters*, 40(6), pp. 1069–1073.
- Möller G., Landskron D. (2019). Atmospheric bending effects in GNSS tomography. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12 (1), pp. 23–34.
- Pincus R., Beljaars A., Buehler S. A., Kirchengast G., Ladstaedter F., Whitaker J. S. (2017). The representation of tropospheric water vapor over low-latitude oceans in (re-)analysis: Errors, impacts, and the ability to exploit current and prospective observations. *Surveys in Geophysics*, 38(6), pp. 1399–1423.
- Savchuk S., Khohtar A. (2019). Analysis of the tropospheric delay estimates in software package – GipsyX based on multi-GNSS observations. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, Вип. I (37), С. 57–63.
- Savchuk S., Khohtar A., Sosonka I. (2020) Processing of a regional network of GNSS stations by the PPP method, Wybrane aspekty zabezpieczenia nawigacji lotniczej, Część 2, Seria wydawnicza współczesna nawigacja, Tom II, pp. 159–171.
- Zhao Q., Yao Y., Yao W. (2017). A troposphere tomography method considering the weighting of input information, *Annales Geophysicae*, 35(6), pp. 1327–1340.
- Інтернет-ресурс Служби атмосферних досліджень університету Вайомінга (США). URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата звернення: травень 2020).

A. KHOPTAR

Department of geodesy and astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. 093-11-07-822, e-mail alina.a.khohtar@lpnu.ua

RECONSTRUCTION OF THE VERTICAL PROFILE OF THE WATER VAPOR CONTENT IN THE TROPOSPHERE BASED ON DATA FROM MULTI-GNSS OBSERVATIONS

The distribution of water vapor content can be reconstructed using observations from the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) using GNSS tomography, which allows to study changes in the vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere. However, there is great uncertainty in the tomography of water vapor content from observations of only one GPS system due to the limited number of satellites. Modernization of the American GPS (Global Positioning System), restoration of the Russian GLONASS (GLObalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), as well as the formation of new constellations of navigation satellites, such as the European system Galileo and the Chinese system BDS (BeiDou Navigation Satellite System) significantly improved the

geometric distribution of satellite signals, which can improve the efficiency of GNSS tomography of water vapor content by combining multi-GNSS data. **The purpose** of this work is to reconstruct the vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere based on the results of processing the data of multi-GNSS observations by the PPP method on the example of GNSS station GANP (Poprad, Slovakia). **Methodology.** A method for reconstruction the vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere by the method of GNSS tomography based on data of multi-GNSS observations of one station by the PPP method is proposed. This technique was tested on real data and simulated (synthetic data). **Results.** The results of the study of the height distribution of water vapor content on the example of GNSS station GANP based on data from multi-GNSS observations by PPP method are presented. To verify the results, a comparison was made with the corresponding atmosphere radio sounding data of the Poprad-Ganovce aerological station (Poprad, Slovakia), which showed that the differences fluctuate at the millimeter level of accuracy. **Scientific novelty and practical significance.** For the first time, an approach of reconstructing the vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere based on multi-GNSS observations from only one station has been proposed. The results of the study solve an important scientific and applied problem of the methodology of reconstruction meteorological quantities in the Earth's troposphere based on data from multi-GNSS observations by GNSS-tomography.

Keywords: Global Navigation Satellite Systems (GNSS); multi-GNSS; Precise Point Positioning (PPP); GNSS-tomography.

References

- Bender M., Dick G, Ge M., Deng Z., Wickert J., Kahle H.G., Tetzlaff G. (2011). Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Advances in Space Research*, 47(10), pp. 1704–1720.
- Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapour using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), pp. 15787–15801.
- Boehm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Flores A. (1999). Atmospheric tomography using satellite radio signal: Ph.D. Dis. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Flores A., Ruffini, G., Rius, A. (2000a). 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays. *Annales Geophysicae*, 18(2), pp. 223–234
- Flores A., Gradinarsky L. P., Elosegui P., Elgered G., Davis J. L., Rius A. (2000b). Sensing atmospheric structure: tropospheric tomographic results of the small-scale GPS campaign at the Onsala space observatory. *Earth, planets and space*, 52(11), pp. 941–945.
- Hirahara K. (2000). Local GPS tropospheric tomography, *Earth, planets and space*, 52(11), pp. 935–939.
- Kruse L. P. (2001). Spatial and temporal distribution of atmospheric water vapor using space geodetic techniques. Doctoral dissertation, ETH Zurich.
- Lagler K., Schindelegger M., Böhm j., Krásná H., Nilsson T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical research letters*, 40(6), pp. 1069–1073.
- Möller G., Landskron D. (2019). Atmospheric bending effects in GNSS tomography. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(1), pp. 23–34.
- Pincus R., Beljaars A., Buehler S. A., Kirchengast G., Ladstaedter F., Whitaker J. S. (2017). The representation of tropospheric water vapor over low-latitude oceans in (re-)analysis: Errors, impacts, and the ability to exploit current and prospective observations. *Surveys in Geophysics*, 38(6), pp. 1399–1423.
- Savchuk S., Khoptar A. (2019). Analysis of the tropospheric delay estimates in software package – GipsyX based on multi-GNSS observations. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Vyp. I (37), pp. 57–63.
- Savchuk S., Khoptar A., Sosonka I. (2020) Processing of a regional network of GNSS stations by the PPP method, Wybrane aspekty zabezpieczenia nawigacji lotniczej, Część 2, Seria wydawnicza współczesna nawigacja, Tom II, pp. 159–171.
- University of Wyoming Department of Atmospheric Science Service (USA), Access mode: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (Access date: May of 2020).
- Zhao Q., Yao Y., Yao W. (2017). A troposphere tomography method considering the weighting of input information, *Annales Geophysicae*, 35(6), pp. 1327–1340.