

УДК 629.056.88+551.51

Ф. ЗАБЛОЦЬКИЙ, С. САВЧУК

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38 (032)-2582181, ел. пошта: ssavchuk@polynet.lviv.ua

ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ЗЕНІТНИХ ТРОПОСФЕРНИХ ЗАТРИМОК ІЗ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ PPP-МЕТОДОМ

Під час проходження сигналів глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) через тропосферу Землі виникає їх тропосферна затримка через зміну показника заломлення середовища. Метод точного позиціонування пункту (PPP) дає змогу досягти сантиметрової/міліметрової точності лише за допомогою одного GNSS-приймача. У цьому методі зенітна тропосферна затримка (ZTD) оцінюється поряд із невідомим положенням пункту спостереження. Розрахована ZTD може бути корисною для метеорологічних застосувань, наприклад, для оцінки вмісту водяної пари в атмосфері. Метод PPP реалізується за допомогою різних алгоритмів та моделей в онлайн-сервісах та програмних пакетах. **Мета** цієї роботи – показати досягнуту в PPP-методі точність оцінки зенітної тропосферної затримки. **Методика.** Подано оцінку точності ZTD від трьох онлайн-сервісів PPP та трьох незалежних програмних пакетів. Для оцінки точності зенітних тропосферних затримок кожним із шести програмних продуктів отримано ряди значень ZTD з п'ятихвилинним інтервалом протягом 12 днів 2019 р. для десяти довільно вибраних GNSS-станцій. **Результати.** Виконано порівняльний аналіз зенітної тропосферної затримки, отриманої за допомогою різного PPP-програмного забезпечення, та відповідного тропосферного продукту Міжнародної служби GNSS (IGS). Обчислені ZTD отримано за допомогою APPS, CSRS-PPP, MagicGNSS, gLab, RTKLIB та GipsyX. Середню квадратичну помилку (СКП) використано як показник точності оцінки ZTD. Встановлено, що GipsyX отримує оцінки ZTD, дуже близькі до значення тропосферного продукту IGS. Тропосферні моделі, реалізовані нині у RTKLIB та gLAB, не враховують належно погодні та атмосферні умови. PPP-корекції, що використовуються онлайн-сервісами CSRS-PPP та APPS, є задовільними. **Наукова новизна та практична значущість.** Аналіз точності зенітних тропосферних затримок, отриманих із GNSS-спостережень PPP-методом, надає уявлення про залежність алгоритму опрацювання та його вплив на оцінку тропосферних затримок. Результати проведеного дослідження вирішують важливу науково-прикладну проблему методології оцінки вмісту водяної пари в атмосфері Землі на основі отриманих із даних GNSS-спостережень зенітних тропосферних затримок.

Ключові слова: зенітні тропосферні затримки; глобальні навігаційні супутникові системи (Global Navigation Satellite Systems, GNSS); абсолютний метод точного позиціонування (Precise Point Positioning, PPP); PPP онлайн-сервіси.

Вступ

Дані GNSS широко використовують для позиціонування та навігації, крім того, вони також можуть використовуватися для моніторингу атмосфери. Відомо, що на GNSS-сигнали, які поширюються в атмосфері Землі, істотно впливають як вміст електронів у іоносфері, так і густина повітря в електрично нейтральній атмосфері (особливо в тропосфері). Вплив тропосфери описується коефіцієнтом заломлення повітря, що залежить від тиску, температури та парціального тиску водяної пари [Заблоцький Ф. Д., 2013].

Отже, прикладом додаткового використання даних GNSS, окрім позиціонування та навігації, є інтеграція тропосферної затримки шляху GNSS-сигналів, що визначається із опрацювання супутникових спостережень, із даними вимірювання мікрохвильового радіометра для досягнення точної корекції вологої складової тропосфери для альтиметричних продуктів. Іншим використанням даних GNSS є дистанційне

зондування атмосфери, у якому сигнали GNSS можуть використовуватися для вимірювання фізичних змінних, таких як температура атмосфери, тиск і висота тропопаузи, необхідні для моніторингу погоди та зміни клімату. Прикладами є також вимірювання за допомогою сигналів GNSS кількості води, що осідає в атмосфері. Тоді значення осаджуваної води можна оцінити із кількості водяної пари в атмосфері, пропорційної до вологої складової тропосферної затримки (ZWD) [Заблоцький Ф. Д., 2013]. Осаджувана вода важлива безпосередньо для прогнозу погоди та вивчення екстремальних погодних явищ.

Волога зенітна затримка ZWD та гідростатична (“суха”) зенітна затримка (ZHD) становлять загальну зенітну тропосферну затримку (ZTD), яку можна оцінити або із застосуванням принципу подвійних різниць DD (*double-differenced*), або методом точного позиціонування пункту (PPP) [Savchuk S., Khoptar A., 2018]. Ефектом подвійних різницевих вимірювань DD

є усунення більшості поширених помилок між різними шляхами проходження GNSS-сигналу. Однак якщо такі помилки можна оцінити, стає перспективним визначення цілочислових неоднозначностей для абсолютних або нерізницевих (*undifferenced*) вимірювань. Після цього фазові вимірювання стають подібними до вимірювань псевдовідстаней із рівнем шуму в кілька міліметрів. З використанням цього методу можна оцінити затримку тропосфери, зміщення положення та годинника приймача, використовуючи точні ефемериди та іоносферні комбінації (*ionospheric-free*) кодових та фазових багаточастотних спостережень [Hofmann-Wellenhof B. et al., 2008].

Метод PPP реалізується за допомогою різних алгоритмів та моделей в онлайн-сервісах та програмних пакетах. У цьому дослідженні висвітлено оцінку точності визначення ZTD від онлайн-сервісів PPP та спеціалізованих програмних пакетів, що реалізують метод PPP.

Точне позиціонування пункту – відома технологія позиціонування, що спирається на спостереження від одного приймача, а також на доступну ефемеридно-часову інформацію (точні супутникові орбіти та поправки годинників) [Zumberge J. F. et al., 1997]. У підході PPP спостереження від одного приймача використовують для оцінки положення приймача, цілочислових фазових неоднозначностей, зміщення годинника GNSS-приймача та тропосферної затримки [Leick A. et al., 2015]. Технологія PPP обслуговує широкий спектр застосувань, таких як: точне позиціонування, зондування водяної пари в атмосфері, геодинамічний моніторинг, визначення параметрів орбіти LEO-супутників Землі, точне землеробство тощо. Останніми роками ця технологія продемонструвала високу здатність стати технологією позиціонування нового покоління.

GNSS-спільнота завжди звертала підвищену увагу на підвищення точності PPP-методу. Застосовуючи різні підходи до розв'язування неоднозначності, деяким авторам [Laurichesse D. et al., 2009] вдалося підвищити точність щогодинних результатів спостережень з 1,5–3,0 до 0,5–1,0 см для компонент топоцентричних координат.

Перевагою розв'язування фазової неоднозначності методом PPP є те, що опрацювання можна виконати безпосередньо на рівні користувача без будь-якої близької чи далекої опорної/референцної станції. Вимога, однак, полягає у тому, що повинні бути доступні точні та *послідовні* супутникові продукти: файл орбіт супутників (.sp3), файл параметрів годинників (.clk) та файл широкозонних супутникових зміщень (.wsb). Ці дані регулярно визначають із 2017 р. на глобальній мережі IGS-станцій різні дослідницькі центри [Kouba J., 2019].

Традиційно визначення величин ZTD ґрунтувалося на аналізі GNSS-даних у режимі пакетного мережевого розв'язку із використанням методу найменших квадратів і способу спостереження, що спирається на утворення подвійних різниць (DD) [Leick A et al., 2015]. Абсолютний метод точного позиціонування (PPP) [Zumberge, J.F. et al., 1997], для реалізації якого був необхідний доступ до точних поправок супутникових годинників разом із прогнозованими орбітами, практично не використовували в GNSS-метеорології. Проте в останні роки ці два різні підходи до аналізу GNSS-даних почали інтенсивно розроблятися саме у GNSS-метеорології. В [Савчук С., Заблоцький Ф., 2016] порівнюють зазначені підходи до опрацювання GNSS-спостережень, а саме DD і PPP у їх реалізаціях: Bernese GNSS Software та Alberding GNSS Status Software, відповідно.

Стосовно оцінювання величин ZTD, то для цього добре підходив би метод радіозондування атмосфери [Savchuk S. et al., 2018]. Проте через значний часовий інтервал між зондуваннями і просторову обмеженість їх, а також залежність якості масиву даних від висоти вимірювань і відмінності у конструкціях радіозондів інтерпретація даних радіозондувань дещо втрачає об'єктивність.

У цій роботі подано порівняльний аналіз ZTD-оцінок, отриманих за допомогою шести різних програмних продуктів із використанням GNSS-даних із десяти станцій мережі IGS. Аналіз виконано за допомогою зіставлення обчислених зенітних затримок та відповідного тропосферного продукту Міжнародної служби GNSS (IGS)

Мета

Мета цієї роботи – визначення досягнутої в PPP-методі точності оцінювання зенітної тропосферної затримки.

Методика

Метод PPP реалізований різними програмними пакетами, які дотримуються різних стратегій опрацювання або використовують точну ефемеридно-часову інформацію (ЕЧІ) з різних джерел. Є онлайн-сервіси, доступні через інтернет, та спеціалізовані програмні пакети, які потрібно встановити та запустити локально на комп'ютері. Для цього дослідження використано шість різних програмних продуктів (ПЗ) з PPP-постопрацюванням: три з них – онлайн-сервіси APPS, CSRS-PPP та magicGNSS та три автономні пакети програм gLAB, RTKLIB та GipsyX. Короткий опис характеристик онлайн-сервісів та програмного забезпечення, використаних для цього дослідження, наводимо в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняння можливостей
програмних продуктів**

ПЗ	Параметри		
	Сузір'я	ЕЧІ	Функ. відобр.
APPS (1)	GPS	JPL	GMF
CSRS-PPP(2)	GPS,GLO	IGS	GMF
magicGNSS (3)	GNSS	IGS	GMF
gLAB (4)	GPS,GLO,Gal	CNES	VMF1
RTKLIB (5)	GPS+GLO	IGS	NMF
GipsyX (6)	GNSS	JPL	GMF

Спільними характеристиками зазначеного ПЗ були: режим опрацювання – статика, використовувані частоти – L1/L2, типи спостережень – кодові та фазові, модель фазових центрів антен – ANTEX, референцна система – IGS2014, кут відсікання – 10°. Спільним є також використання розширеного фільтра Кальмана (EKF) для позиціонування методом PPP. Тоді в обчислювальній схемі гідростатична компонента ZHD загальної тропосферної затримки визначається за допомогою відомих моделей Saastamoinen, Hopfield, IFADIS тощо та функцій відображення, наприклад, Neilla, а волога зенітна затримка ZWD є невідомою величиною у EKF. Загальну зенітну тропосферну затримку обчислюють як суму вологої та сухої компонент:

$$ZTD = ZHD_{\text{модель}} + ZWD_{\text{обчислена з FKP}}.$$

Спеціалізовані програмні пакети gLAB, RTKLIB та GipsyX, що реалізують метод PPP, були встановлені на комп'ютері. Для всіх них необхідно завантажити файл спостереження, а для PPP також потрібні точні ефемериди та поправки годинників (ЕЧІ). Додатково введено інші виправлення, такі як припливні навантаження (*Ocean Tide Loading*), параметри фазового центра антени, тропосферні моделі для гідростатичної складової ZTD, параметри орієнтування Землі (EOP), моделі впливу другого порядку іоносфери, систематичні зміщення, пов'язані із релятивістським та гравітаційним ефектом, windup-ефектом. Для цього дослідження були використані кінцеві продукти IGS, JPL та CODE.

Дані, використані в цьому експерименті, зібрано з мереж IGS/EPN, у яких працює понад 1000 GNSS-станцій у всьому світі та в Європі зокрема. Сервіс IGS забезпечує щоденні та щогодинні файли спостереження для кожної станції. Крім того, IGS надає інші продукти, такі як супутникові ефемериди, параметри обертання Землі та тропосферну затримку, яку надалі називатимемо “тропосферний продукт IGS”. Ця затримка генерується із наземних GNSS-даних за допомогою програмного пакета Bernese. Для її обчислення використовують кут відсікання супутників 7°, остаточної продукти IGS. Часовий інтервал для ZTD становить 5 хв, а функцією відображення є GMF – глобальна функція відображення. Для цього дослідження використано дані спостереження із десяти станцій мереж IGS/EPN, перелічених у табл. 2, а також тропосферний

продукт IGS протягом періоду досліджень. Вибрані для дослідження дні були 15-ми календарними днями усіх місяців 2019 р.

Таблиця 2

**Перелік вибраних для дослідження
IGS/EPN станцій**

Станція	Місце розташування	Шир., °	Довг., °	Вис., м
BAIA	Байа Маре, RO	47.6	23.6	271
BOR1	Боровец, PL	52.3	17.1	125
CNIV	Чернігів, UA	51.5	31.3	176
GANP	Попрад, SK	49.0	20.3	746
GLSV	Київ, UA	50.3	30.5	227
KTVL	Кацивелі, UA	44.4	34.0	067
MIKL	Миколаїв, UA	47.0	32.0	095
POLV	Полтава, UA	49.6	34.5	178
SULP	Львів, UA	49.8	24.0	370
WROC	Врослав, PL	51.1	17.1	180

Вибір GNSS-станцій був зумовлений наявністю та доступністю даних спостережень та ефемеридно-часової інформації для них.

Результати

Для оцінювання точності зенітних тропосферних затримок кожним із шести програмних продуктів отримано ряди значень ZTD з п'ятихвилинним інтервалом протягом 12 днів 2019 р. для десяти вибраних GNSS-станцій. Як показник точності використано середню квадратичну похибку (СКП), що обчислювалася як:

$$СКП = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ZTD_{\text{обч.}} - ZTD_{\text{IGS/EPN}})^2}{n}},$$

де n – загальна кількість наявних значень ZTD. СКП обчислювали для кожної станції та кожного програмного забезпечення на вибраний день, використавши всі наявні значення ZTD.

У табл. 3 наведено узагальнені оцінки СКП усіх розбіжностей, що визначалися для кожного програмного пакета та кожної PPP онлайн-послуги.

Таблиця 3

**Значення СКП для кожного програмного
забезпечення з використанням усіх даних, см**

Дата	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	2	3	4	5	6	7
15.01	2,3	0,8	1,9	1,5	4,8	0,4
15.02	2,2	1,4	2,6	0,9	3,7	0,6
16.03	1,8	1,2	2,8	1,8	5,0	0,3
15.04	2,5	1,9	3,2	2,0	4,2	0,2
15.05	2,7	1,0	3,3	2,1	4,0	0,3
14.06	3,2	2,1	4,0	1,9	3,6	0,1
15.07	1,9	1,4	3,5	2,2	3,9	0,2
15.08	2,4	1,8	3,9	2,0	3,1	0,3
15.09	2,9	2,2	4,3	2,1	3,4	0,1
17.10	2,0	0,9	2,8	1,6	4,0	0,2
15.11	3,1	1,3	3,7	1,9	4,2	0,4
15.12	3,1	1,7	4,0	2,2	5,0	0,2

З табл. 3 видно, що тільки онлайн-сервіс CSRS-PPP та, частково, APPS оцінює ZTD на ближче значення до тропосферного продукту IGS, ніж програмний сервіс magicGNSS. СКП здебільшого дорівнює або менше ніж 3 см. З трьох програмних пакетів, що працюють локально, GipsyX мав найменші СКП.

Кожне програмне забезпечення, використане для аналізу й описане в цьому дослідженні, застосовує аналогічну стратегію для оцінки зенітних тропосферних затримок, яку описано вище.

Те PPP програмне забезпечення, що використовує функцію відображення на основі даних про числові моделі погоди (GMF), краще моделює затримку, спричинену тропосферою, тоді як програмне забезпечення реалізує функцію відображення Niell, яка залежить лише від координат станції та дня року. Використання GMF є однією із причин того, що оцінку зенітних затримок отримують ближчою до продукту IGS-тропосфери.

Залишковий ефект іоносфери є ще однією причиною того, що обчислені значення та значення ZTD у тропосферному продукті IGS відрізняються. Модель, застосовану для корекції ефекту іоносфери, часто не зазначають, або не використовують зовсім. Тому залишкові ефекти не усуваються, і вони можуть спричинити вплив на оцінку обчисленого ZTD.

Третьою причиною розбіжностей між обчисленим ZTD та значеннями в тропосферному продукті IGS є різні кути відсікання, становлені у програмному забезпеченні. Різниця на кілька градусів впливає на оцінку ZTD, оскільки деякі супутники можуть бути відкинуті у PPP-розв'язках.

Наукова новизна і практична значущість

Виконаний аналіз точності зенітних тропосферних затримок, отриманих із GNSS-спостережень PPP-методом, надає уявлення про залежність алгоритму опрацювання та його вплив на оцінку тропосферних затримок. Результати проведеного дослідження вирішують важливу науково-прикладну проблему методології оцінювання вмісту водяної пари в атмосфері Землі на основі отриманих із даних GNSS-спостережень зенітних тропосферних затримок.

Висновки

Здійснено порівняльний аналіз зенітної тропосферної затримки, отриманої за допомогою різного PPP програмного забезпечення, та відповідного тропосферного продукту Міжнародної служби GNSS (IGS). Обчислені ZTD отримано за допомогою APPS, CSRS-PPP, MagicGNSS, gLab, RTKLIB та GipsyX. Середню квадратичну помилку (СКП) використано як показник точності оцінки ZTD.

Встановлено, що GipsyX отримує оцінки ZTD, дуже близькі до значення тропосферного продукту IGS. Тропосферні моделі, реалізовані нині у RTKLIB

та gLAB, не враховують належно погодні та атмосферні умови. PPP-корекції, які використовують онлайн-сервіси CSRS-PPP та APPS, є задовільними. Сезонна зміна періоду спостережень особливо не впливала на оцінку ZTD PPP-програмним забезпеченням.

Література

- Заблоцький Ф. Д. (2013). ГНСС-метеорологія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 96 с.
- Савчук С., Заблоцький Ф. (2016). Моніторинг тропосферної водяної пари в західній транскордонній зоні України. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, вип. 83, С. 21–34.
- Automatic Precise Positioning Service (APPS), available at: <http://apps.gdgps.net/>
- CSRS-PPP service, available at: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>
- Final IGS station tropospheric zenith path delay, available at: <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/troposphere/gLAB software tool>, available at: <https://gage.upc.edu/gLAB/>
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. (2008). GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer, Vienna, 516 p.
- Kouba J. (2019). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products. Available online: <http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf> accessed on 4 October 2019).
- Laurichesse D., Flavien M., Jean-Paul B., Patrick B., Luca C. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation*, 56 (2), pp. 135–149.
- Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. (2015). GPS satellite surveying, 4th edn. Wiley, New York, 399 p.
- magicGNSS Web Service, available at: <https://magicgnss.gmv.com>
- RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, available at: <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>
- Savchuk S., Kablak N., Khoptar A. (2018) Comparison of approaches to zenith tropospheric delay determination based on data of atmosphere radio sounding and GNSS observation. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, вип. 88, С. 24–32.
- Savchuk S., Khoptar A. (2018). Estimation of Slant Tropospheric Delays from GNSS Observations with Using Precise Point Positioning Method. *Annual of Navigation*, vol. 25, pp. 253–266.
- Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, pp. 5005–5017.

F. ZABLITSKYI, S. SAVCHUK

Department of geodesy and astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38 (032)-2582181, e-mail ssavchuk@polynet.lviv.ua

ON DETERMINATION OF ZENITH TROPOSPHERIC DELAYS FROM GNSS OBSERVATIONS BY THE PPP METHOD

During signal propagation of the Global Navigation Satellite System (GNSS) through the Earth's troposphere, their tropospheric delay arises due to a change of the medium refractive index. The precise point positioning (PPP) method allows to achieve the cm/mm accuracy by only of one GNSS receiver. Zenith tropospheric delay (ZTD) is estimated in this method simultaneously with the unknown position of the observation point. The calculated ZTD can be useful for meteorological applications, for example, to estimate the water vapor content in the atmosphere. The PPP method is implemented using various algorithms and models in online services and software packages. The **purpose** of this work is to show the achieved accuracy in the PPP method of zenith tropospheric delay estimating. **Method.** The ZTD accuracy estimation is provided by three online PPP services and by three independent software packages. To the accuracy estimate of zenith tropospheric delays, ranges of ZTD values were obtained for each of the six software products with a 5-minutes interval during 12 days of 2019 for the ten arbitrarily selected GNSS stations. **Results.** A comparative analysis of zenith tropospheric delay obtained using different PPP software and the corresponding tropospheric product of the International GNSS Service (IGS) was performed. The calculated ZTDs were obtained by means of the APPS, CSRS-PPP, MagicGNSS, gLab, RTKLIB and GipsyX software packages. The root mean square error (RMS) was used as an accuracy estimate indicator of the ZTD. It was found that GipsyX receives ZTD estimates very close to the tropospheric product value of IGS. The tropospheric models currently implemented in RTKLIB and gLAB packages do not take into account weather and atmospheric conditions properly. The PPP corrections used by the online services are satisfactory. **Scientific novelty and practical significance.** The analysis of the zenith tropospheric delays accuracy obtained from GNSS observations was carried out by means of the PPP method. This gives an idea on dependence of the processing algorithm and its impact on the estimation of tropospheric delays. The results of this study solve an important scientific and applied problem of the methodology for the estimating of water vapor content in the Earth's atmosphere on the basis of observations obtained from GNSS zenith tropospheric delays.

Key words: Zenith Tropospheric Delay; Global Navigation Satellite Systems (GNSS); Precise Point Positioning (PPP); online PPP services.

References

- Zablits'kyi F. D. (2013). GNSS-meteorolohiya. L'viv: Vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniki, 96 s.
- Savchuk S., Zablits'kyi F. (2016). Monitorynh troposfernoyi vodyanoi pary v zakhidniy transkordonniy zoni Ukrayiny. Heodeziya, kartohrafiya i aerofotoznimannya, Vyp. 83, S. 21–34.
- Automatic Precise Positioning Service (APPS), available at: <http://apps.gdgps.net/>
- CSRS-PPP service, available at: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>
- Final IGS station tropospheric zenith path delay, available at: <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/troposphere/>
- gLAB software tool, available at: <https://gage.upc.edu/gLAB/>
- Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E (2008) GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer, Vienna. 516 p.
- Kouba J. (2019). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products. Available online: <http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf> accessed on 4 October 2019).
- Laurichesse D., Flavien M., Jean-Paul B., Patrick B., Luca C. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation*, 56 (2), pp. 135–149.
- Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. (2015). GPS satellite surveying, 4th edn. Wiley, New York, 399 p.
- magicGNSS Web Service, available at: <https://magicgnss.gmv.com>
- RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, available at: <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>
- Savchuk S., Kablak N., Khoptar A. (2018). Comparison of approaches to zenith tropospheric delay determination based on data of atmosphere radio sounding and GNSS observation. *Heodeziya, kartohrafiya i aerofotoznimannya*, Vyp. 88, C. 24–32.
- Savchuk S., Khoptar A. (2018). Estimation of Slant Tropospheric Delays from GNSS Observations with Using Precise Point Positioning Method. *Annual of Navigation*, Vol. 25, pp. 253–266.
- Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 5005–5017.