

АНОТАЦІЯ

Хонтар А.А. Томографія тропосфери на основі опрацювання даних мульті-GNSS спостережень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 - Геодезія та землеустрій (19 «Архітектура та будівництво»). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

За останні роки наукове застосування Глобальних Навігаційних Супутникових Систем (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) в науках про Землю отримали важливий статус та роль. З модернізацією американської GPS (Global Positioning System), відновленням російської ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), а також новими сузір'ями навігаційних супутників, такими як європейська система Galileo та китайська система BDS (BeiDou Navigation Satellite System) у становленні GNSS відбулися кардинальні зміни в області багаточастотних сузір'їв – мульті-GNSS, що приносить великі можливості як для наукових, так і технічних застосувань, оскільки значне поліпшення видимості супутників, просторової геометрії, зумовлює підвищення точності та достовірності результатів супутникових вимірювань на основі опрацювання даних мульті-GNSS спостережень. Зі швидким розвитком GNSS, абсолютний метод точного позиціонування (Precision Point Positioning, PPP) також просувається вперед. Головна перспектива застосування даного методу полягає у автономності визначення просторового положення точок. На сучасному етапі розвитку науки є низка проблем, які знаходяться на стику різних напрямів. Одною з таких проблем, вирішення якої можливе із використанням GNSS-технологій, відноситься дослідження вмісту водяної пари в тропосфері Землі, що відіграє значну роль в багатьох атмосферних

процесах. Таким чином, основна увага даної дисертаційної роботи зосереджена на проведенні наукових досліджень розширення методичних можливостей відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі на основі опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом.

У розділі 1 «Сучасні GNSS-технології та їх використання у дослідженнях атмосфери Землі» розглянуто можливості дослідження геодезичних параметрів з використання даних мульти-GNSS спостережень. Виходячи з огляду літературних джерел, можна стверджувати, що PPP-метод на сучасному етапі розвитку GNSS-технологій з використанням точної ефемеридно-часової інформації та удосконалених геофізичних моделей забезпечує точність позиціонування до 1 см в режимі пост-опрацювання, а за умови отримання близьких за точністю параметрів DD-метода, який традиційно вважається більш надійним, PPP-метод може все частіше вибиратися в якості основного. Варто відмітити, що PPP-метод має незаперечну перевагу при визначенні тропосферних затримок та аналізі інтегральної кількості водяної пари. Значне поліпшення результатів супутникових вимірювань проявляється з використанням даних мульти-GNSS спостережень, що не тільки розширюють можливості застосування точного позиціонування PPP-методом, але також пропонують збільшену кількість сигналів, що дає незаперечну перевагу для моніторингу параметрів тропосфери на основі GNSS-спостережень. Розглянуто підхід до розширення методичних можливостей відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі.

У розділі 2 «Опрацювання даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом та його застосування для тропосферних параметрів» розглянуто програмне забезпечення для опрацювання GNSS-спостережень. Особливу увагу приділялося пакету програмного забезпечення (ППЗ) GipsyX, як основного засобу для опрацювання даних. З проведеного аналізу можливості застосування PPP-методу за результатами опрацювання даних

мульти-GNSS спостережень було виявлено, що обидва підходи, тобто з використанням PPP- і DD-методів характеризуються високим рівнем збіжності горизонтальних координат: від 0.5 мм до 6.2 мм для Bernise GNSS Software та від 1.1 мм до 4.3 мм для GAMIT/GLOBK. Результати порівняння висотної компоненти є менш задовільними: різниці двох підходів становили приблизно 5-8 мм, а у окремих випадках не значно перевищували 10 мм. За даними експериментальних досліджень тропосферних параметрів, значення різниць між результатами опрацювання даних GNSS-спостережень станції GANP, отриманими PPP- та DD-методами, та відповідними даними радіозондування аерологічної станції Poprad-Ganovce становили 6 мм, при цьому різниці отримані PPP-методом – 2 мм, а DD-методом – 8 мм. Представлено результати опрацювання даних GNSS-спостережень 8 станцій Європейської перманентної мережі на території України, Польщі та Словаччини (GLSV, KHAR, SULP, BOGO, REDZ, WROC та GANP) у вигляді значень *ZTD* та *STD*. Результати порівняння отриманих значень *ZTD* з відповідними даними радіозондування, показали достатній рівень гармонізації зі стандартним відхиленням приблизно в 2 мм на станціях GANP – Poprad-Ganovce. Приведені результати визначення тропосферних параметрів на основі мульти-GNSS спостережень, демонструють високу узгодженість з даними радіозондування. Результати показують, що в порівнянні з односистемними «GPS», «ГЛОНАСС», «Galileo», «BDS», середня кількість ефективних сигналів для мульти-GNSS збільшується в середньому в 5.7 раз на 0.00 годин впродовж липня 2018 року. Таким чином, запропонована методика опрацювання даних мульти-GNSS спостережень за допомогою ППЗ GipsyX може служити основою для визначення тропосферних параметрів, які в подальшому можуть бути використані для просторової реконструкції параметрів тропосфери методом GNSS-томографії. Отримана точність також дає можливість симуляції даних тропосферних затримок, що покращує можливості реалізації відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі.

В розділі 3 «Застосування даних мульти-GNSS спостережень та методу PPP для відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі» було розроблено та реалізовано методику відновлення вертикального профілю вмісту водяної пари в тропосфері Землі методом GNSS-томографії за результатами обчислених, в рамках розділу 2, тропосферних параметрів GNSS-станції GANP на основі даних мульти-GNSS спостережень PPP-методом. Запропонована методика використовується на базі даних мульти-GNSS спостережень однієї станції з розділенням області дослідження на шари вертикально, тоді як функція густини водяної пари представляється горизонтально, а не дискретизує зону дослідження на багато вокселів, як у багатьох попередніх дослідженнях в даному напрямку, що є нововведенням цієї роботи. Отримані результати вказують на перевагу запропонованої методики порівняно з традиційними методами.

Ключові слова: Глобальні навігаційні супутникові системи (Global Navigation Satellite Systems, GNSS), атмосферні дослідження, зенітна тропосферна затримка (Zenith Tropospheric Delay, ZTD), похила тропосферна затримка (Slant Tropospheric Delay, STD), вміст водяної пари у похиленому напрямку (Slant Water Vapor, SWV), абсолютний метод точного позиціонування (Precise Point Positioning, PPP), мульти-GNSS, GNSS-томографія тропосфери.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях іншої держави

1. Savchuk, S., Khoptar, A. (2018). Estimation of slant tropospheric delays from GNSS observations with using precise point positioning method. *Annual of Navigation*, Volume 25, pp. 253-266. DOI:10.1515/aon-2018-0017.
2. Khoptar, A. (2017). Analysis of approaches in integration of common solutions of different space geodetic techniques. *International scientific journal «Baltic Surveying»*, Volume 7, pp. 8-13.

Статті у наукових періодичних виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз

3. 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. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Геодезія, картографія та аерофотознімання»*, Випуск 88, с. 24-32. DOI:10.23939/istcgcap2018.02.024.

Статті у наукових фахових виданнях України

4. Savchuk, S., Khoptar, A. (2019). Analysis of the tropospheric delay estimates in software package – GipsyX based on multi-GNSS observations. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск I (37), с. 57-63. DOI: 10.33841/1819-1339-2019-1-37-57-63.

5. Хоптар, А. (2017). Методика отримання спільного розв'язку за даними GNSS I SLR на рівні спостережень. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск II (34), с. 51-54.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, а саме матеріали та тези міжнародних і вітчизняних науково-технічних та наукових конференцій

6. Хоптар, А. (2019). Дослідження можливостей визначення зенітних тропосферних затримок за даними мульти-GNSS спостережень з використання пакету програмного забезпечення GipsyX. *Збірник тез 24-тої Міжнародної науково-технічної конференції «GEOFORUM'2019»*, – Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 5-6.

7. Хоптар, А. (2018). Можливості визначення тропосферних затримок за даними мульти-GNSS спостережень з допомогою програмного пакета –

GipsyX. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2018»*, – Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 11-12.

8. Хоптар, А. (2018). Визначення похилих тропосферних затримок за даними спостережень на GNSS станції SULP. *Матеріали IX -ї міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні»*, Секція: *Геодезія, картографія та кадастр*, – Ужгород: ТОВ «РІК-У», с. 29-33.

9. Хоптар, А. (2018). Огляд сучасних підходів визначення зенітних тропосферних затримок на основі GNSS спостережень. *Збірник тез 23-тї Міжнародної науково-технічної конференції «GEOFORUM'2018»*, – Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 11-12.

10. Хоптар А. Порівняльний аналіз підходів визначення тропосферної затримки за даними радіозондування та GNSS спостережень. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2017»*, – Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 15-16.

11. Хоптар, А. (2016). Можливість створення пунктів колокації для різних технологій супутникових спостережень. *Матеріали VII -ї міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні»*, Секція: *Геодезія, картографія та кадастр*, – Ужгород: Видавництво «ФОП Сабов А.М.», с. 65-70.

12. Савчук, С., Хоптар, А. (2014). Принципи створення спільних розв'язків для різних технологій супутникових спостережень. *Науковий вісник Ужгородського університету*, Випуск 3, с. 54-58.

ANNOTATION

Khoptar A.A. Troposphere tomography based on the data processing of multi-GNSS observations. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) on specialty 193 - Geodesy and Land Management (19 «Architecture and Construction»). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2020.

In recent years, the scientific application of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in the Earth sciences has gained important status and role. With modernization of the American GPS (Global Positioning System), restoration of the Russian GLONASS (GLObal'naja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema), as well as new constellations of navigation satellites, such as the European Galileo system and the Chinese BDS system (BeiDou Navigation Satellite System) in formation of GNSS have been radical changes in the field of multifrequency constellations – multi-GNSS, which brings great opportunities for both scientific and technical applications, as a significant improvement in satellite visibility, spatial geometry, increases the accuracy and reliability of satellite measurements based on multi-GNSS observation data. With the rapid development of GNSS, the Precise Point Positioning (PPP) is also moving forward. The main prospect of application of this method is the autonomy of determining the spatial position of points. At the present stage of science development there are a number of problems that are at the intersection of different areas. One of such problem, the solution of which is possible with the use of GNSS-technologies, is the study of water vapor content in the Earth's troposphere, which plays a significant role in many atmospheric processes. Thus, the main attention of this dissertation is focused on conducting research of expanding the methodological possibilities of reconstructing the vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere based on the processing of multi-GNSS observations by the PPP method.

In section 1 «Modern GNSS-technologies and their use in studies of the Earth's atmosphere» discusses the possibilities of studying geodetic parameters using data from multi-GNSS observations. Based on a review of the literature, it can be argued that the accuracy of PPP method at the present stage of development of GNSS-technologies using accurate ephemeris-time information and advanced geophysical models provides positioning accuracy up to 1 cm in post-processing mode, and subject to provide close in accuracy parameters to the DD-method, which is traditionally considered more reliable, PPP-method can increasingly be chosen as the main. It should be noted that this method has an undeniable advantage over the method of relative determinations in calculations of tropospheric delays and integral of water vapor content. Significant improvements of satellite measurements are made using multi-GNSS observations, which not only enhance the application of PPP positioning, but also offer an increased number of signals, which is an undeniable advantage for monitoring troposphere parameters based on GNSS observations. An approach to expanding the methodological possibilities of reconstruction vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere is considered.

In section 2 «Data processing of multi-GNSS observations by PPP method and its application for tropospheric parameters» discusses the software packages for processing GNSS observations. Particular attention was paid to the software package GipsyX, as the main tool for data processing. From the analysis of the applying the PPP method possibility based on the processing of multi-GNSS observations, it was found that both approaches, ie using PPP- and DD-methods are characterized by a high level of convergence of horizontal coordinates: from 0.5 mm to 6.2 mm for Bernise GNSS Software and from 1.1 mm to 4.3 mm for GAMIT / GLOBK. The results of the comparison of the height component are less satisfactory: the differences between the two approaches were approximately 5-8 mm, and in some cases do not significantly exceed 10 mm. According to experimental studies of tropospheric parameters, the difference between the results of processing GNSS observations of station GANP obtained by PPP- and DD

methods, and the corresponding radio sounding data of Poprad-Ganovce aerological station is 6 mm, while the differences obtained by PPP method – 2 mm, and DD -method – 8 mm. The results of GNSS-observation data processing of 8 stations of the European permanent network on the territory of Ukraine, Poland and Slovakia (GLSV, KHAR, SULP, BOGO, REDZ, WROC, and GANP) in the form of *ZTD* and *STD* values are presented. The results of comparing obtained values *ZTD* with the corresponding radiosounding data showed a sufficient level of harmonization with a standard deviation of approximately 2 mm at stations GANP - Poprad-Ganovce. The results of determining tropospheric parameters based on multi-GNSS observations, show high consistency with radiosounding data. The results show that compared to the single-system "GPS", "GLONASS", "Galileo", "BDS", the average number of effective signals for multi-GNSS increases by an average of 5.7 times on 0.00 hours during July 2018. Thus, the proposed method of processing data of multi-GNSS observations using software package GipsyX can serve as a basis for determining tropospheric parameters, which then can be used for spatial reconstruction of troposphere parameters by GNSS tomography. The obtained accuracy also makes it possible to simulate the data of tropospheric delays, which improves the implementation of the reconstruction of the vertical profiles of water vapor content in the Earth's troposphere.

In section 3 «Application of multi-GNSS observation data and PPP method to reconstruct vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere» was developed and implemented a method of reconstruction vertical profile of water vapor content in the Earth's troposphere by GNSS-tomography based on the results of the calculations, under section 2. The proposed technique is used on the basis of multi-GNSS observations of one station with the division of the study area into layers vertically, while the water vapor density function is represented horizontally, rather than discretizing the study area on many voxels, as in much previous studies in this direction. The obtained results indicate the advantage of the proposed method compared to traditional methods.

Key words: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), atmospheric research, (Zenith Tropospheric Delay, *ZTD*), (Slant Tropospheric Delay, *STD*), (Slant Water Vapor, *SWV*), Precise Point Positioning, (PPP), multi-GNSS, GNSS-tomography of the troposphere.

THE RESEARCHER LIST OF PUBLICATIONS WHICH CONTAIN THE MAIN SCIENTIFIC RESULTS OF THIS DISSERTATION

Publications in scientific editions of other countries

1. Savchuk, S., Khoptar, A. (2018). Estimation of slant tropospheric delays from GNSS observations with using Precise Point Positioning method. *Annual of Navigation*, Volume. 25, pp. 253-266. DOI:10.1515/aon-2018-0017.
2. Khoptar, A. (2017). Analysis of approaches in integration of common solutions of different space geodetic techniques. *International scientific journal «Baltic Surveying»*, Volume 7, pp. 8-13.

Publications in scientific editions of Ukraine, which are included in international science-computer databases

3. 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. Interdepartmental scientific and technical collection «*Geodesy, Cartography and Aerial Photography*», Volume 88, pp. 24-32. DOI:10.23939/istcgcap2018.02.024.

Publications in scientific professional editions of Ukraine

4. Savchuk, S., Khoptar, A. (2019). Analysis of the tropospheric delay estimates in software package – GipsyX based on multi-GNSS observations // *Modern achievements of geodesic science and industry*, Volume I (37), pp. 57-63. DOI: 10.33841/1819-1339-2019-1-37-57-63.

5. Khoptar, A. Method of determining the tropospheric parameters from compatible data of SLR and GNSS observations. *Modern achievements of geodesic science and industry*, Volume II (34), pp. 51-54.

Publications that testify to the approbation of the dissertation materials, namely the materials and abstracts of international and national scientific and technical conferences

6. Khoptar, A. (2019). Research of possibilities for determination of zenith tropospheric delays based on data from multi-GNSS observations using GipsyX software package. *Proceedings of 24th international scientific technical conference «GEOFORUM'2019»*, p. 10.

7. Khoptar, A. (2018). Possibilities of tropospheric delay determination according to data of multi-GNSS observations with using a software package – GipsyX. *Proceedings of International Conference of young scientist «GeoTerrace-2018»*, pp. 51-54.

8. Savchuk, S., Khoptar, A. (2018). Slant tropospheric delays determination by observations at GNSS station SULP. *Materials of the IX International Scientific and Practical Conference «New technologies in geodesy, land management, forest management and nature management»*, pp. 29-33.

9. Khoptar, A. (2018). Overview of modern approaches for determination of zenith tropospheric delays based on GNSS observations. *Proceedings of 23th International Scientific Technical Conference «GEOFORUM'2018»*, pp. 11-12.

10. Khoptar, A. (2017) Comparative analysis of tropospheric delay determination approaches based on data of radio sounding observations. *Proceedings of International Conference of young scientist «GeoTerrace-2017»*, pp. 15-16.

11. Khoptar, A. (2016). Possibility of creation co-located sites for various technology of satellite observations. *Materials of the VIII International Scientific and Practical conference «New technologies in geodesy, land management, forest management and nature management»*, pp. 65-70.

12. Savchuk, S., Khoptar, A. (2014). Principles for creating common solutions for satellite observations various technology. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University*, Volume 3, pp. 54-58.