

АНОТАЦІЯ

Сосонка І.І. Аналіз та оцінка якості часових серій координат референціальних GNSS-станцій України. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 «Науки про Землю» (10 «Природничі науки»). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

Довготривалі часові серії координат GNSS-станцій набули широкого застосування для моніторингу рухів Землі (наприклад, тектоніка плит, зміна рівня моря, дослідження руху полюсів та ін.). У часовому ряді координат ми можемо виявити лінійну чи нелінійну тенденцію, річні та піврічні сигнали, розриви та шум вимірювань. Більшість методів аналізу фокусуються на визначенні щорічних сигналів, дослідженні розривів у часових рядах і, нарешті, оцінці надійних швидкостей зміни координат опорних станцій, оскільки вони повинні бути стабільними протягом декількох десятиліть, що вимагає надійних методів спостереження та опрацювання даних, а також розуміння основних динамічних процесів. Залежно від характеру сигналу та інших факторів, що спричиняють зміни часового ряду, необхідні специфічні методи для розрізнення сигналів, що походять від тектонічного переміщення, та інших нетектонічних сигналів, таких, наприклад, як сезонні зміни. Ці методи можуть бути використані як для візуальної інтерпретації та попереднього опрацювання часових рядів, так і статистичного аналізу на предмет їх точності та необхідності врахування ряду джерел систематичних похибок.

Візуальна інтерпретація та попереднє опрацювання отриманих часових рядів координат включає виявлення та видалення зсувів та випадкових

значень, характеристик шуму, оцінку тренду та сезонних змін, а також аналіз залишкових похибок. Щодо статистичного аналізу на предмет необхідності врахування ряду джерел систематичних похибок, то можливим є використання широкого асортименту математичних підходів. Одним із них є неklasична теорія похибок вимірів (НТПВ). Її визначають як сучасну теорію математичного опрацювання даних часових рядів з достатньо великим обсягом вибірки (більше 500), оскільки відомо, що при багаторазових GNSS-вимірюваннях, фундаментальні принципи класичної теорії похибок вимірювань (КТПВ) перестають бути репрезентативними. Таким чином, основна увага даної дисертаційної роботи зосереджена на проведенні наукових досліджень часових серій для якісної оцінки точності визначення координат та оцінки придатності GNSS-станцій України для задач геодинаміки.

У розділі 1 «Аналіз методів опрацювання GNSS-даних та створення часових серій координат» розглянуто методи досліджень часових серій координат. Виходячи з огляду літературних джерел, можна стверджувати, що класичні методи досліджень часових серій координат дозволяють виключати відомі джерела похибок з достатньо високою точністю, не залежно від використаних методів опрацювання. Проте, при великій вибірці спостережень, детальніший аналіз часових серій координат вказує на неспроможність класичних методів виявляти залишкові похибки, тому є доцільним використання неklasичних методів для аналізу довготривалих спостережень. Методи НТПВ використовують в астрометрії, космічних дослідженнях, геодезичних задачах і геофізичних експериментах.

У розділі 2 «Фільтрація та аналіз часових серій координат» розглянуто процедуру аналізу часових серій координат. Фільтрування часових серій від лінійного тренду, річних сигналів, випадкових значень та зсувів дозволило

вилучити систематичні похибки та випадкові значення та згладити часові серії координат. Порівняння отриманих значень середньо-квадратичних похибок до та після проведення процедури фільтрації вказує на те, що застосування класичних методів аналізу часових серій дозволяє зменшити вплив різного роду похибок в середньому на 40-50% для всіх складових координат. Результати виконаної фільтрації та аналізу, що було проведено для мережі станцій України, дозволяє виконувати уточнення координат окремих станцій.

У розділі 3 «Математичний апарат для аналізу часових серій координат» розглянуто класичні методи та неklasичний метод аналізу часових серій координат. Виявлено, що кореляція між окремими станціями мереж може досягати значних величин, через що часові серії містять похибки загального режиму (Common Mode Errors, CME), які можуть бути вилучені широким спектром класичних методів. Використання просторово-часової фільтрації, методу найменших квадратів, оцінки максимальної правдоподібності дозволяють зменшити вплив цих похибок в середньому на 40%. Проте подальший аналіз отриманих часових серій, наприклад при порівнянні різних періодів спостережень, у деяких випадках показав, що результати значно відрізняються в залежності від обраного методу опрацювання, що вказує на наявність залишкових похибок, виявити які класичними методами неможливо. Застосування неklasичної теорії похибок вимірів передбачається при математичному опрацюванні великих обсягів спостережень, оскільки вони не підкоряються нормальному закону розподілу. Апробація НТПВ для перманентних станцій мереж IGS та EPN, розташованих на території України показала, що ймовірність P того, що виміри є вибілковими із нормальної генеральної сукупності відповідно змінюються в межах від 0.001 до 0.92. А це означає, що реальні розподіли

похибок вимірів не підпорядковуються нормальному закону, але узгоджуються в рамках застарілих класичних уявлень про закон розподілу похибок великого обсягу.

У розділі 4 «Методика оцінки придатності GNSS-станцій для геодинамічних досліджень» було розроблено та реалізовано методику якісної оцінки точності визначення координат та оцінки придатності GNSS-станцій для задач геодинаміки. Апробація методики проведена для перманентних станцій Європи, що відносяться до різних класів точності. Перевірка на нормальність вимірів цих часових рядів для станцій, що входять в категорію C0 показала хороші результати ймовірності $p(\chi^2)$ того, що виміри на станціях є вибілковими з нормальної генеральної сукупності склали від 0,14 до 0,98 в середньому для всіх складових координат. Для станцій C6 ця перевірка показала, що $0,001 < p(\chi^2) < 0,16$, що підтверджує дію слабких, не вилучених систематичних похибок. Практичне застосування методики проведено для аналізу 72 референцних станцій України, та за отриманими значеннями асиметрії, ексцесу, емпіричних розподілів та значень ймовірностей розроблена класифікація станцій, яка дозволила виділити станції, що є придатними для геодинамічних досліджень.

Ключові слова: Глобальні навігаційні супутникові системи (Global Navigation Satellite Systems, GNSS), часові серії координат, Common Mode Errors, CME, класична теорія похибок вимірів (КТПВ), некласична теорія похибок вимірів (НТПВ), тренд, північна складова (North, N), східна складова (East, E), вертикальна складова (Up, U), залишкові похибки.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Dvulit, P., Savchuk, S., Sosonka, I. (2021). Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements. *Geodesy and Geodynamics*, Volum 12, Issue 5, p. 347-355 DOI:10.1016/j.geog.2021.07.005.

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

2. Dvulit, P., Savchuk, S., Sosonka, I. (2020). The processing of GNSS observation by non-classical error theory of measurements. *Науковий журнал "Геодинаміка"*, Випуск 1(28), p. 19-28, DOI:10.23939/jgd2020.01.019.

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Sosonka I. (2021). Determination of the correlation degree between GNSS stations of Ukraine based on time series. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2021. № 8 (2). С. 21–26, DOI:10.36023/ujrs.2021.8.2.191.

Публікація у науковому виданні, яка додатково відображає наукову цінність дисертації

4. Savchuk, S., Khoptar, A., Sosonka, I. (2020). Processing of a regional network of GNSS stations by the PPP method. *Wybrane aspekty zabezpieczenia*

nawigacji lotniczej, Seria wydawnicza "Problemy współczesnej nawigacji", Część 2, pp. 159-170.

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

5. Савчук, С., Сосонка, І.(2014). Аналіз щоденних комбінованих розв'язків мережі референцних GNSS станцій України. *Науковий вісник Ужгородського університету*, Випуск 3, Ужгород, с. 43-47.

6. Сосонка, І. (2014). Аналіз часових рядів зміни координат референцних станцій України. *Збірник тез та доповідей 72-ї студентської науково-технічної конференції*, Львів, с. 50-52.

7. Сосонка, І. (2017). Порівняння методів аналізу часових серій координат референцних GNSS-станцій : підготовчий етап. *збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2017»*, Львів, с. 42-44.

8. Савчук, С., Сосонка, І. (2018). Визначення впливу іоносферних ефектів вищих порядків на точність координат GNSS станцій. *Збірник матеріалів ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні»*, Ужгород, с. 39-42.

9. Сосонка, І., Боїло, Д. (2018). Аналіз похибок часових серій координат референцних GNSS-станцій. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2018»*, Львів, с. 55-56.

10. Сосонка, І. (2019). Аналіз часових серій координат GNSS-станцій України за допомогою програмного пакету iGPS. *Збірник тез 24-тої*

Міжнародної науково-технічної конференції «GEOFORUM'2019» Львів-Яворів-Брюховичі, с. 8-9.

11. Сосонка, І. (2020). Опрацювання та аналіз часових серій координат референцних GNSS-станцій України із використанням програмного пакету iGPS. *Збірник тез 25 Міжнародної науково-технічної конференції «GEOFORUM'2020», с. 97-100.*

12. Двудіт, П., Сосонка, І. (2020). Некласичний підхід до моделювання похибок просторових координат GNSS-вимірів. *Збірник наукових праць учасників Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції в математичному моделюванні і його програмному забезпеченні», Рівне, с. 5-8.*

13. Проданець, І., Сосонка, І. (2020). Оцінка точності визначення координат GNSS-станцій мережі ZAKPOS. *Збірник матеріалів X Міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні», Випуск 1, Ужгород, с. 7-12.*

ABSTRACT

Sosonka I.I. Analysis and evaluation of the quality of coordinate time series of Ukrainian reference GNSS-stations. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) on specialty 103 – Earth Sciences (10 «Natural Sciences»). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

Long-term time series of GNSS-stations have been widely used to monitor Earth's movements (eg, plate tectonics, sea level changes, pole motion studies, etc.). We can detect a linear or nonlinear trend, annual and semi-annual signals, gaps, and measurement noise in the time series of coordinates. Most analysis methods are focused on identifying annual signals, analyzing time series gaps, and finally estimating reliable rates of reference station coordinates changes, as they must be stable for several decades, which requires reliable methods for observing and processing data and understanding basic dynamic processes. Depending on the nature of the signal and other factors that cause time series changes, specific methods are needed to distinguish between signals from tectonic movement and other non-tectonic signals, such as seasonal changes. These methods can be used both for visual interpretation and pre-processing of time series, and statistical analysis for their accuracy and the need to take into account a number of systematic errors sources.

Visual interpretation and pre-processing of the obtained time series of coordinates includes detection and removal of offsets and random errors, noise characteristics, assessment of the trend and seasonal changes, as well as analysis of residual errors. Regarding statistical analysis on the need to take into account a number of systematic errors sources, it is possible to use a wide range of

mathematical approaches. One of them is the Non-classical error theory of measurement (NETM). It is defined as a modern theory of mathematical processing of time series data with a sufficiently large sample size (more than 500) because it is known that with multiple GNSS-measurements, the fundamental principles of Classical error theory of measurement (CETM) cease to be representative. Thus, the main attention of this dissertation is focused on conducting research of time series for qualitative assessment of the accuracy of determining the coordinates and assessing the suitability of Ukrainian GNSS-stations for geodynamic researches.

In section 1 "Analysis of methods for processing GNSS data and creating coordinate time series" discusses methods for research time series of coordinates. Based on a review of literature sources, it can be argued that the classical methods of research of time series of coordinates allow excluding known sources of errors with sufficiently high accuracy, regardless of the methods used. However, with a large sample of observations, a more detailed analysis of the time series of coordinates indicates the inability of classical methods to detect residual errors, so it is advisable to use non-classical methods for the analysis of long-term observations. The NETM methods are used in astrometry, space research, geodetic researches and geophysical experiments.

In section 2 «Filtration and analysis of time series of coordinates" the procedure of analysis of coordinate time series is considered. Filtering time series from linear trend, annual signals, random errors, and offsets allowed to eliminate systematic and random errors and smooth time series of coordinates. Comparison of the obtained values of RMS errors before and after the cleaning procedure indicates that the use of classical methods of time series analysis can reduce the impact of various errors by an average of 40-50% for all coordinate components. The results of the performed filtering and analysis, which was carried out for the

network of Ukrainian stations, allow specifying the coordinates of individual stations.

In section 3 "Mathematical apparatus for the analysis of time series" discusses the classical and non-classical methods of analysis of coordinate time series. It was found that the correlation between individual network stations can reach significant values, due to which time series contain Common Mode Errors (CME), which can be removed by a wide range of classical methods. The use of Spatio-temporal filtering, the Least Squares Method (LSM), Maximum Likelihood Estimation (MLE) can reduce the impact of these errors by an average of 40%. However, further analysis of the obtained time series, for example when comparing different periods of observations, in some cases, showed that the results differ significantly depending on the chosen method of processing, which indicates the presence of residual errors, which can not be detected by classical methods. Application of non-classical error theory of measurement is assumed in the mathematical processing of large volumes of observations because they do not confirm to the normal distribution law. Approbation of NETM for permanent stations of IGS and EPN networks located on the territory of Ukraine showed that the probability P that the measurements are sampled from the normal general population varies in the range from 0.001 to 0.92. This means that the real distributions of measurement errors are not confirm to the normal law, but are consistent in the framework of outdated classical ideas about the law of distribution of large errors.

In section 4 "Methods for assessing the suitability of GNSS-stations for geodynamic research" was developed and implemented a method of qualitative assessment of the accuracy of coordinates and assessment of the suitability of GNSS-stations for geodynamic researches. The approbation of the method was carried out for permanent stations in Europe belonging to different accuracy

classes. Verification of the normality of the measurements of the time series for stations in category C0 showed good results of the probability $p(\chi^2)$ that the measurements at the stations are sampled from the normal summation from 0.14 to 0.98 on average for all coordinate components. For C6 stations, this validation showed that $0,001 < p(\chi^2) < 0,16$, which confirms the effect of weak, not removed systematic errors. The practical application of the method was carried out for the analysis of 72 Ukrainian reference stations, and according to the obtained values of asymmetry, excess, empirical distributions, and probability values, classification of stations was developed, which allowed to select stations suitable for geodynamic research.

Key words: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), coordinate time series, Common Mode Errors (CME), Classical Error Theory of Measurements (CETM), Non-classical Error Theory of Measurements (NETM), trend, North component (*N*), East component (*E*), Up component (*U*), residual errors.

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

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

1. Dvulit, P., Savchuk, S., Sosonka, I. (2021). Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements. *Geodesy and Geodynamics*, Volum 12, Issue 4, DOI:10.1016/j.geog.2021.07.005.

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

2. Dvulit, P., Savchuk, S., Sosonka, I. (2020). The processing of GNSS observation by non-classical error theory of measurements. *Geodynamics*, Volume 1(28), p. 19-28, DOI:10.23939/jgd2020.01.019.

Publications in scientific professional editions of Ukraine

3. Sosonka I. (2021). Determination of the correlation degree between GNSS stations of Ukraine based on time series. *Ukrainian journal of remote sensing*. № 8 (2). p. 21–26, DOI:10.36023/ujrs.2021.8.2.191.

Publication in a scientific journal, which additionally reflects the scientific value of the dissertation

4. Savchuk, S., Khoptar, A., Sosonka, I. (2020). Processing of a regional network of GNSS stations by the PPP method. *Wybrane aspekty zabezpieczenia nawigacji lotniczej, Seria wydawnicza "Problemy współczesnej nawigacji"*, Część 2, pp. 159-170.

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

5. Savchuk, S., Sosonka, I. (2014). Analysis of daily combined solutions of the network of reference GNSS-stations of Ukraine. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University*, Volume 3, Uzhorod, pp. 43-47.

6. Sosonka, I. (2014). Analysis of time series of coordinates changes of Ukrainian reference stations. *Collected abstracts and reports of the 72nd student scientific and technical conference*, Lviv, pp. 50-52.

7. Sosonka, I. (2017). Comparison of analysis methods of coordinate time series of reference GNSS-stations: preparatory stage. *Proceedings of International Conference of young scientist «GeoTerrace-2017»*, Lviv, pp. 42-44.

8. Savchuk, S., Sosonka, I. (2018). Determination of the influence of higher order ionospheric effects on the accuracy of GNSS-station coordinates. *Materials of the IX International Scientific and Practical Conference «New technologies in geodesy, land management, forest management and nature management»*, Uzhorod, pp. 39-42.

9. Sosonka, I., Boilo, D. (2018). Analysis of coordinate time series errors of reference GNSS-stations. *Proceedings of International Conference of young scientist «GeoTerrace-2018»*, Lviv, pp. 55-56.

10. Sosonka, I. (2019). Analysis of coordinate time series of Ukrainian GNSS-stations using the iGPS software package. *Proceedings of 24th international scientific technical conference «GEOFORUM'2019»* Lviv-Iavoriv-Bruhovuchi, pp. 8-9.

11. Sosonka, I. (2020). Processing and analysis of coordinate time series of Ukrainian reference GNSS-stations using the iGPS software package. *Proceedings of 25th international scientific technical conference «GEOFORUM'2020»*, pp. 97-100.

12. Dvulit, P., Sosonka, I. (2020). A non-classical approach to modeling the errors of spatial coordinates of GNSS measurements. *Collection of scientific works of the participants of the International scientific-practical conference "Modern tendencies in mathematical modeling and its software"*, Rivne, pp. 5-8.

13. Prodanets, I., Sosonka, I. (2020). Estimation the accuracy of coordinates determination of GNSS-stations of the ZAKPOS network. *Materials of the X International Scientific and Practical Conference «New technologies in geodesy,*

land management, forest management and nature management», Volume 1,
Uzhorod, pp. 7-12.