

Петро ДВУЛІТ¹, Степан САВЧУК², Ірина СОСОНКА³

Національний університет “Львівська політехніка”, Інститут геодезії, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, dvupet@ukr.net, ssavchuk@polynet.lviv.ua, iryna.i.sosonka@lpnu.ua, ¹ <https://orcid.org/0000-0003-1803-5116>, ² <https://orcid.org/0000-0002-2475-9666>, ³ <https://orcid.org/0000-0002-8740-8687>

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.94.005>

ДІАГНОСТИКА МЕТРОЛОГІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОТОЧНИХ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТОДАМИ НЕКЛАСИЧНОЇ ТЕОРІЇ ПОХИБОК ВИМІРІВ

Мета дослідження – провести діагностику метрологічної характеристики високоточних GNSS-спостережень методами неklasичної теорії похибок вимірів (НТПВ) на прикладі референціальних станцій України. Нами було підібрано 72 референціальні GNSS-станції України, завантажено добові файли спостережень із сервера центру аналізу LPI, та створено часові серії в топоцентричній системі координат. Тривалість часових серій становить майже два роки (24 березня 2019–2 січня 2021). Із використанням спеціалізованого програмного пакету виконали очищення часових серій від високів, розривів, сезонних впливів, та вилучено трендову складову. Перевірка емпіричних розподілів похибок забезпечувалася процедурою неklasичної теорії похибок вимірів на основі рекомендацій, запропонованих Г. Джеффрісом і на принципах теорії перевірок гіпотез за критерієм Пірсона. Встановлено, що отримані часові серії координат на більшості референціальних GNSS-станцій не підтверджують гіпотезу про їх підпорядкування нормальному закону розподілу Гаусса. Проведення НТПВ-діагностики точності високоточних GNSS-вимірів, яка ґрунтується на використанні довірчих інтервалів для оцінок асиметрії і ексцесу значної вибірки із наступним застосуванням – тесту Пірсона, – підтверджує наявність слабких, не вилучених із GNSS-опрацювання джерел систематичних похибок. Авторами задіяна можливість НТПВ для вдосконалення методики опрацювання високоточних GNSS-вимірів та необхідність врахування джерел систематичних похибок. Неврахування окремих факторів породжує ефект зміщення часового координатного ряду, що, своєю чергою, зумовлює суб’єктивні оцінки швидкостей руху станцій, тобто їхню геодинамічну інтерпретацію. Дослідження причин відхилень розподілу похибок від встановлених норм забезпечує метрологічну грамотність інтерпретації високоточних GNSS-вимірів великого обсягу.

Ключові слова: закони похибок Гаусса, Пірсона–Джеффріса; неklasична теорія похибок вимірів (НТПВ); GNSS-виміри; референціальна станція.

Вступ

Довготривалі часові серії координат GNSS-станцій набули широкого застосування для моніторингу рухів Землі (наприклад, тектоніка плит, зміна рівня моря, дослідження руху полюсів та ін.). В першу чергу, тривалі GNSS-спостереження, що проводяться на перманентних і референціальних станціях, дозволяють визначати глобальний та місцевий рух тектонічних плит, а також виділяти сезонні коливання [Maciuk, et al., 2021]. Швидкості руху тектонічних плит, отриманих з часових серій координат, регулярно використовуються як вхідні дані для геофізичних моделей.

Проте, як показують численні дослідження, часові серії координат містять додаткові річні та піврічні сигнали, а також “місцеві” систематичні сигнали, що може суттєво вплинути на достовірність отриманих оцінок швидкостей [Blewitt & Lavallée, 2002].

У загальному випадку для високоточного визначення координат необхідно використовувати GNSS-вимірювання, отримані в результаті оцінки затримки часу поширення навігаційного сигналу по фазі несучих коливань, які є результатом вимірів поточних навігаційних параметрів – кодової та фазової псевдовідстані.

Основні похибки GNSS-вимірювань пов'язані із:

- розходженням шкал часу між приймачем сигналів користувача та конкретної GNSS;
- розходженням шкал часу між конкретним навігаційним супутником та його навігаційною системою;
- залишкова затримка розповсюдження в іоносфері радіосигналу кожного окремого супутника до приймача користувача в робочому діапазоні частот, наприклад L1 та L2;
- затримка розповсюдження радіосигналу в тропосфері Землі;
- цілочислова неоднозначність псевдофазових вимірювань [Karaim, et al., 2018].

Це означає, що необхідним є виявлення залишкових систематичних впливів вже після проведення опрацювання GNSS-вимірювань. Одним із методів аналізу часових серій координат із залишковими неврахованими систематичними похибками є неklasична теорія похибок вимірів. На нашу думку, основною складовою цих залишкових похибок є метрологічна ситуація навколо конкретних станцій спостережень. Ще однією причиною додаткових сигналів є поверхневе навантаження, спричинене гідрологічними змінами та коливаннями атмосферного тиску. У дослідженні [Van Dam, et al., 2001] показано, що гідрологічні моделі (також з урахуванням атмосферного навантаження) сильно корелюють з часовими серіями координат, при цьому зменшення дисперсії у висотній координатній компоненті приблизно дорівнює дисперсії цих моделей. Сезонні зміни, які найкраще описуються за допомогою детермінованої моделі, швидше за все сприятимуть похибці визначення швидкості зміни координат, в основному, за короткотривалих GNSS-спостережень. Допоки фізичні моделі річних сигналів адекватно не будуть описувати спостережувані зміни, розумним рішенням цієї проблеми залишається оцінка річного сигналу одночасно зі швидкістю станції та початковими її координатами. Іншою стратегією було використання просторово-часової фільтрації [Wdowski, et al., 1997]. Проте вона не буде достатньо ефективною для великих регіонів, або

для досліджень стабільності основних тектонічних плит.

Треба також зазначити, що геодезичні дослідження майже завжди покладаються на наявність точної глобальної системи відліку ITRS/ITRF. Наприклад, така система відліку є важливою для точних супутникових орбіт, створених Міжнародною GNSS службою (IGS), параметрів обертання Землі, створених Міжнародною службою обертання Землі та референціальних систем (IERS), координат глобальних референціальних GNSS-станцій та швидкостей їх зміни для визначення кінематики відносно стабільних тектонічних плит. При цьому поточні процедури створення ITRF-реалізацій земної референціальної системи не враховують річних сигналів при отриманні швидкостей зміни координат, і тим більше – “місцевих” систематичних сигналів.

Сигнали, що повторюються щорічно, як правило, містять не тільки річний синусоїдний компонент, але й річні гармоніки. Отже, оцінка лише річної амплітуди та фази не пом'якшить весь ефект цього сигналу.

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 чи місцеві зміни. Ці методи можуть бути використані як для візуальної інтерпретації та попереднього опрацювання часових рядів, так і для статистичного аналізу на предмет їх точності й необхідності врахування ряду джерел систематичних похибок [Jiang, et al., 2017].

Візуальна інтерпретація та попереднє опрацювання отриманих часових рядів координат включає виявлення та видалення зсувів і вискоків, характеристик шуму, оцінку тренду та сезонних змін, а також аналіз залишкових похибок. Найпоширенішими інструментами для таких цілей є GGMatlab (TSView) [Herring, 2003], FODITS [Ostini, et al., 2008], CATS, Hector, iGPS тощо. Підпрограма TSView є доповненням програмного пакету GAMIT/GLOBK, а FODITS вбудований у програмне забезпечення BERNESE,

та самостійні програми CATS [Williams, 2008], Nector iGPS [Tian, 2011] тощо.

Щодо статистичного аналізу на предмет необхідності виявлення ряду джерел систематичних похибок, то можливим є використання широкого асортименту математичних підходів. Одним із них, як вже було зазначено, є неklasична теорія похибок вимірів (НТПВ).

У цій статті пропонується розглянути конкретні концепції НТПВ щодо GNSS-спостережень на референцних станціях України за 2019–2020 роки і проаналізувати результати досліджень з погляду геодинамічних змін складових топоцентричних координат.

Мета

Мета дослідження: провести діагностику метрологічної характеристики високоточних GNSS-спостережень методами НТПВ для оцінки придатності GNSS-станцій до розв'язування задач найвищої точності, зокрема і геодинаміки.

Методика

Достовірна точність визначення абсолютних координат геодезичних пунктів сьогодні з GNSS-спостережень знаходиться на рівні 1 см, а швидкості зміни координат – на рівні 1–2 мм/рік [Dvulit, et al., 2020]. Створення автоматизованих систем спостережень є найбільш істотним і важливим викликом сучасної епохи, який привів до суттєвого зростання обсягів вимірювань. Практично це означає, що класична теорія похибок вимірювання (КТПВ) Гаусса при опрацюванні спостережень великого обсягу не може забезпечити ефективність оцінювання [Dvulit, et al., 2021]. Розглядаючи розподіли рядів похибок великих обсягів спостережень, англійський вчений Джефферіс зробив впевнений висновок, що при числі спостережень $n > 500$ гіпотеза нормальності практично і теоретично є неспроможною, оскільки при цьому похибки вимірювань не підкоряються закону Гаусса, а підкоряються розподілу Пірсона VII типу з діагональною інформаційною матрицею Фішера:

$$f(x) = \frac{\Gamma(m+1)}{\sqrt{2\pi(m-0.5)} \cdot \Gamma(m+0.5)} \times \frac{1}{\sigma} \cdot \left[1 + \frac{0.5}{M} \left(\frac{x-\lambda}{\sigma} \right)^{-2} \right]^{-m}, \quad (1)$$

де $\Gamma(m)$ – гамма функція, λ, σ – параметри позиціонування і розсіювання, m – ключовий параметр закону (1), що є мірою його відхилення від нормального закону, $M = (m - 0.5)^3 \cdot m^{-2}$.

Використання форми розподілу Пірсона VII типу дозволяє контролювати відсутність невідповідних, тобто корельованих похибок у результатах спостережень.

Отже, якщо похибки великих вибірок підкоряються закону Пірсона–Джефферіса в розумінні розподілу Пірсона VII типу, то форма цього розподілу визначається величиною значення ексцесу ε . Це означає, що кожній станції спостережень (вимірювальний прилад та місце проведення спостережень) властиві свої значення ексцесу, своє певне відхилення від закону Гаусса, що характеризується ключовою метрологічною характеристикою розподілу похибок. На основі масової перевірки цього закону за результатами емпіричних розподілів похибок для економічних, космічних, астрономічних, гравіметричних і геодезичних досліджень було встановлено [Двуліт, Джуль, 2017; Джуль, 2015] наведене нижче.

1. Значення величин ексцесів:
 - а) економічних $\varepsilon = 2,895 \pm 0,142$,
 - б) космічних $\varepsilon = 1,719 \pm 0,052$,
 - в) астрономічних $\varepsilon = 1,077 \pm 0,015$,
 - г) гравіметричних $\varepsilon = 0,810 \pm 0,105$,
 - д) геодезичних $\varepsilon = 0,767 \pm 0,034$.

2. Асиметрія цих рядів спостережень є малою і незначною.

3. Параметр m , за яким визначається величина ексцесу, розглядають як міру відхилення розподілу Пірсона–Джефферіса від закону Гаусса. Випадкові незалежні похибки при великих обсягах вимірювань ($n > 500$) підкоряються закону Пірсона–Джефферіса з показником степені m в межах: $3 \leq m \leq 5$.

4. Впливом дії не вилучених, корельованих систематичних похибок у результатах спостережень можна знехтувати лише в тих випадках, якщо довірчий інтервал для їх асиметрії покриває нуль, а довірчий інтервал для ексцесу покриває нуль, або знаходиться в додатній області:

$$A_s = 0; \varepsilon_s = 0.$$

5. НТПВ опирається на КТПВ з метою подальшої ефективності оцінок та удосконалення опрацювання високоточних результатів спостережень.

Для перевірки того, чи підкоряються результати емпіричних розподілів похибок координат референсних станцій України закону Пірсона–Джефферіса, нами були підібрані 72 GNSS-станції. Головним критерієм вибору станцій була наявність безперервних тривалих серій спостережень тривалістю два роки.

На кафедрі вищої геодезії та астрономії проводиться регулярне опрацювання даних GNSS-спостережень із референсних станцій України на основі використання програмного пакету Gipsy-Oasis. З метою створення часових серій координат використовувалася низка додаткових спеціалізованих програм. Їхнім призначенням був вибір послідовних щодобових геоцентричних координат для конкретної станції в один сумарний файл, а потім, шляхом перетворення в топоцентричну систему N, E, U , формування часової серії.

Для зручності подальшого аналізу референсних GNSS-станцій були згруповані блоками за різними характеристиками: за висотою розміщення станції, за географічним розташуванням та за обладнанням, що встановлене на станції. Перший поділ «за висотою» мав такі блоки: менше 150 м (11 станцій), від 150 до 250 м (29 станцій), від 250 до 350 м (12 станцій), від 350 м (9 станцій). Наступний поділ «за географічним розташуванням» мав такий вигляд: Захід (Зд, 24 станції), Північний центр (Пн-Цт – 24 станції), Південний центр (Пд-Цт – 14 станцій) та Схід (Сх – 8 станцій). Поділ «за обладнанням», що використовується на станції, мав такі блоки: Novatel Inc. (27 станцій), Leica Geosystems (12 станцій), Trimble (10 станцій), Topcon (13 станцій). Тривалість спостережень на кожній з них становила майже 2 роки (з 24 березня 2019 р. (2046 GPS/тиждень) – до 2 січня 2021 р. (2138 GPS/тиждень)).

Для попередньої перевірки стабільності роботи станції спостережень нами використовувався програмний пакет iGPS. За його допомогою на панелі «Побудова графіків» можна визначити наявність трендової складової часового ряду,

піврічної або річної, яка надалі асоціюється із лінійною/нелінійною швидкістю зміни координат станції. Якщо часовий ряд станції характеризується значними нелінійними зміщеннями, то вони за допомогою утиліти <Outlier> вилучалися з опрацювання. Програма також визначає та виводить на графічний інтерфейс величину СКП на кожну координатну компоненту N, E, U окремо. Для автоматичної оцінки лінійної річної швидкості та менших діапазонів використовуємо утиліту <Model>.

Для врахування цих зміщень використовуємо утиліту <Model> повторно з використанням файлу зміщень. На рис. 1, а наведено графічний приклад, отриманий на основі стандартного опрацювання часового ряду координат GNSS-станції BORZ (м. Борзна Чергівської обл.), а на рис. 1, б – результат, отриманий після застосування фільтрації на основі iGPS.

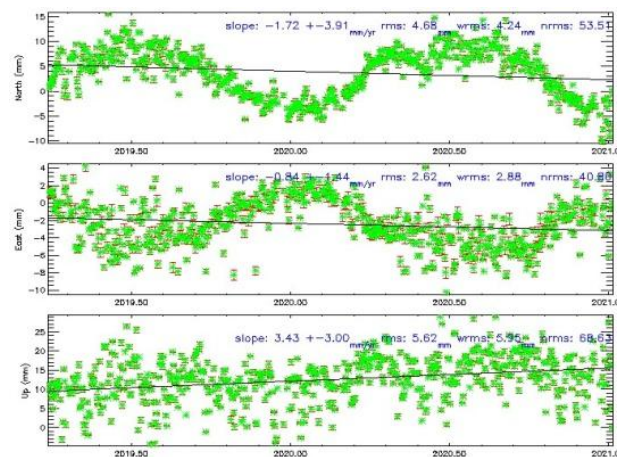


Рис. 1, а. «Сирий» часовий ряд координат станції BORZ

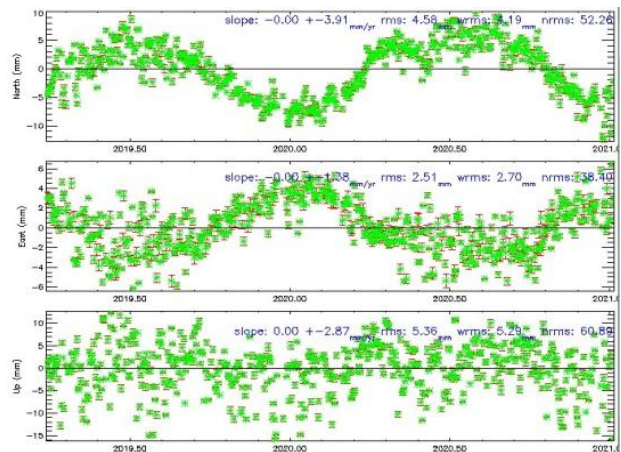


Рис. 1, б. Часовий ряд координат станції BORZ після фільтрації

Далі були обчислені середні значення топоцентричних координат N, E, U і похибки відхилень кожного окремого значення від середнього із вибірки. Отже, ми отримали часові емпіричні ряди залишкових компонентів часових рядів топоцентричних координат відповідних станцій.

Результати

Будь яке відхилення дійсного розподілу похибок GNSS-координат від ідеальної математичної форми буде викликане дією змінних систематичних похибок, які стають помітними при великій кількості спостережень. Ці відхилення виражаються значеннями асиметрії та ексцесу дійсного розподілу похибок. Якщо вагова функція є несингулярною за умови

$$A = 0; e \geq 0, \quad (2)$$

то будь яке відхилення від цих умов буде доказом сильного і недопустимого впливу змінних систематичних похибок.

$$s_A = \sqrt{\frac{4m_2^2 m_6 - 12m_2 m_3 m_5 - 24m_2^3 m_4 + 9m_3^2 m_4 + 35m_2^2 m_3^2 + 36m_2^5}{4m_2^5 n}}; \quad (6)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{m_2^2 m_8 - 4m_2 m_4 m_6 - 8m_2^3 m_3 m_5 + 4m_4^3 - m_2^2 m_4^2}{m_2^6 n} + \sqrt{16m_2 m_3^2 m_4 + 16m_2^3 m_3^2}} \quad (7)$$

де m_r – центральні моменти порядку r , n – вибірка.

Отримавши значення A, \mathcal{E}, s_A, s_e за формулами (3–4, 6–7), визначаємо довірчі інтервали для A і \mathcal{E} :

$$A \pm t_a \cdot s_A; e \pm t_a \cdot s_e, \quad (8)$$

де $t_a=1,645$ – квантиль, який визначається за допомогою функції Лапласа для рівня ризику $\alpha=10\%$; s_A і s_e отримуємо із формул (6 і 7).

Якщо довірчі інтервали для асиметрії і ексцесу накривають нуль, тоді при опрацюванні GNSS-вимірів можна обмежитись методами оцінювання КТПВ. Усі інші випадки будуть свідчити про різні патології в роботі обладнання чи зміну умов спостереження.

Для перевірки того, що отримані результати спостережень потрапляють в межі допустимого оцінювання A , необхідно побудувати довірчі інтервали для знайдених значень асиметрії та ексцесу похибок, які можемо отримати на основі незмішених оцінок моментів:

$$A = \frac{\sqrt{n(n-1)} m_3}{n-2} \frac{m_3}{m_2^{1,5}}; \quad (3)$$

$$e = \frac{(n-1)(n^2-2n+3) m_4}{n(n-2)(n-3)} \frac{m_4}{m_2^2} - \frac{3(n-1)(2n-3)}{n(n-2)(n-3)} - 3, \quad (4)$$

де n – вибірка; m_r – вибіркові центральні моменти порядку r , обчислені за результатами вимірів x_i :

$$m_r = n^{-1} \sum (x_i - \bar{x})^r; \bar{x} = n^{-1} \sum x_i; \quad (5)$$

де x_i – координати станції, \bar{x} – середнє значення координат.

Для побудови довірчих інтервалів для асиметрії та ексцесу можна використати стандартні похибки цих статистик:

Результати наших досліджень приведені у таблицях 1, 2 і 3. В них даються довірчі інтервали для асиметрії та ексцесу для кожної компоненти координат N, E, U , а також кількості від’ємних та додатних значень цих інтервалів.

Відповідно до теорії перевірки гіпотез Неймана–Пірсона, якщо довірчі інтервали охоплюють нуль, то це є необхідна і, як правило, достатня ознака нормальності похибок вимірювань. Якщо ж хоча б один довірчий інтервал нуль не покриває, то для вирішення питання про несингулярність чи сингулярність вагової функції потрібно скористатися табл. 2, наведеною у [Dvulit, Dzhun, 2019], пам’ятаючи про те, що тільки закони Гаусса і Пірсона–Джеффріса забезпечують можливість отримання невироджених оцінок при математичній обробці даних [Dvulit, Dzhun, 2019].

Розподіл станцій за наведеними вище критеріями не показав якихось особливостей у розподілах похибок координат. Тому можна зробити висновок, що отримані результати залежать від місцевих особливостей станцій.

Якщо оцінки параметрів знаходяться з генеральної сукупності окремих значень випадкової величини, яка підпорядковується нормальному закону розподілу, то це ще не гарантія того, що самі оцінки теж мають нормальний розподіл.

Таблиця 1

Довірчі інтервали для A_s і e_s залежно від висоти референцих GNSS-станцій

Висота, м		Довірчі інтервали для A_s				Довірчі інтервали для e_s			
		Від'ємні	К-ть	Додатні	К-ть	Від'ємні	К-ть	Додатні	К-ть
0–150	N	$-0,436 < A_s < -0,048$	9	$0,003 < A_s < 0,676$	11	$-0,732 < e_s < -0,265$	5	$0,052 < e_s < 2,002$	15
	E	$-0,977 < A_s < -0,040$	15	$0,201 < A_s < 0,706$	5	$-0,630 < e_s < -0,170$	4	$0,246 < e_s < 2,439$	16
	U	$-0,488 < A_s < -0,003$	6	$0,009 < A_s < 0,629$	14	-0,088	1	$0,056 < e_s < 2,773$	19
150–250	N	$-0,583 < A_s < -0,017$	25	$0,025 < A_s < 0,930$	33	$-1,299 < e_s < -0,065$	18	$0,008 < e_s < 2,790$	40
	E	$-1,228 < A_s < -0,001$	25	$0,000 < A_s < 0,887$	33	$-1,344 < e_s < -0,017$	17	$0,006 < e_s < 4,469$	41
	U	$-0,573 < A_s < -0,003$	30	$0,035 < A_s < 0,640$	28	$-1,377 < e_s < -0,004$	19	$0,001 < e_s < 2,212$	39
250–350	N	$-0,507 < A_s < -0,021$	10	$0,033 < A_s < 0,843$	14	$-0,754 < e_s < -0,011$	8	$0,083 < e_s < 2,468$	16
	E	$-0,579 < A_s < -0,010$	7	$0,001 < A_s < 0,928$	17	$-0,868 < e_s < -0,028$	8	$0,050 < e_s < 3,422$	16
	U	$-0,559 < A_s < -0,064$	11	$0,000 < A_s < 0,770$	13	$-1,117 < e_s < -0,142$	5	$0,076 < e_s < 2,433$	19
Більше 450	N	$-0,817 < A_s < -0,077$	13	$0,009 < A_s < 0,325$	7	$-1,256 < e_s < -0,008$	6	$0,066 < e_s < 1,745$	14
	E	$-0,414 < A_s < -0,072$	5	$0,061 < A_s < 1,323$	15	$-0,626 < e_s < -0,253$	2	$0,264 < e_s < 4,747$	18
	U	$-1,017 < A_s < -0,244$	11	$0,019 < A_s < 0,569$	9	$-1,352 < e_s < -0,327$	4	$0,156 < e_s < 3,188$	16

Таблиця 2

Довірчі інтервали для A_s і e_s залежно від географічного розташування референцих GNSS-станцій

Час-тина		Довірчі інтервали для A_s				Довірчі інтервали для e_s			
		Від'ємні	К-ть	Додатні	К-ть	Від'ємні	К-ть	Додатні	К-ть
Зд	N	$-0,817 < A_s < -0,030$	25	$0,009 < A_s < 0,834$	23	$-1,299 < e_s < -0,008$	10	$0,066 < e_s < 2,468$	38
	E	$-0,689 < A_s < -0,010$	14	$0,001 < A_s < 1,323$	34	$-1,344 < e_s < -0,052$	5	$0,144 < e_s < 4,745$	43
	U	$-1,017 < A_s < -0,030$	29	$0,000 < A_s < 0,569$	19	$-1,377 < e_s < -0,327$	6	$0,156 < e_s < 3,188$	42
Пн–Цт	N	$-0,583 < A_s < -0,017$	20	$0,035 < A_s < 0,930$	26	$-1,125 < e_s < -0,065$	12	$0,008 < e_s < 2,790$	34
	E	$-1,228 < A_s < -0,001$	17	$0,000 < A_s < 0,887$	29	$-0,863 < e_s < -0,017$	15	$0,006 < e_s < 4,469$	31
	U	$-0,425 < A_s < -0,003$	18	$0,058 < A_s < 0,640$	28	$-0,775 < e_s < -0,004$	16	$0,001 < e_s < 1,374$	30
Пд–Цт	N	$-0,550 < A_s < -0,021$	12	$0,033 < A_s < 0,676$	16	$-0,754 < e_s < -0,011$	10	$0,072 < e_s < 2,002$	18
	E	$-0,977 < A_s < -0,024$	15	$0,089 < A_s < 0,545$	13	$-0,868 < e_s < -0,028$	9	$0,050 < e_s < 3,111$	19
	U	$-0,537 < A_s < -0,029$	14	$0,009 < A_s < 0,770$	14	$-1,117 < e_s < -0,142$	8	$0,010 < e_s < 2,142$	20
Сх	N	$-0,351 < A_s < -0,078$	7	$0,003 < A_s < 0,468$	9	$-0,732 < e_s < -0,194$	7	$0,047 < e_s < 1,042$	9
	E	$-0,933 < A_s < -0,040$	11	$0,198 < A_s < 0,631$	5	$-0,630 < e_s < -0,170$	4	$0,144 < e_s < 2,074$	12
	U	$-0,156 < A_s < -0,050$	4	$0,145 < A_s < 0,912$	12	-0,088	1	$0,203 < e_s < 2,773$	15

Таблиця 3

Довірчі інтервали для A_s і e_s залежно від обладнання референцих GNSS-станцій

Виробник		Довірчі інтервали для A_s				Довірчі інтервали для e_s			
		Від'ємні	К-ть	Додатні	К-ть	Від'ємні	К-ть	Додатні	К-ть
Novatel	N	$-0,753 < A_s < -0,038$	24	$0,003 < A_s < 0,678$	30	$-1,256 < e_s < -0,050$	30	$0,014 < e_s < 1,312$	24
	E	$-0,691 < A_s < -0,018$	23	$0,014 < A_s < 0,758$	31	$-0,630 < e_s < -0,028$	17	$0,006 < e_s < 3,111$	37
	U	$-0,594 < A_s < -0,029$	27	$0,009 < A_s < 0,629$	27	$-1,352 < e_s < -0,004$	16	$0,056 < e_s < 3,188$	38
Leica	N	$-0,358 < A_s < -0,017$	10	$0,061 < A_s < 0,930$	12	$-0,424 < e_s < -0,011$	2	$0,008 < e_s < 2,790$	20
	E	$-1,228 < A_s < -0,001$	15	$0,097 < A_s < 0,437$	7	$-0,802 < e_s < -0,199$	5	$0,179 < e_s < 4,469$	17
	U	$-0,470 < A_s < -0,030$	7	$0,064 < A_s < 0,621$	15	$-0,831 < e_s < -0,143$	4	$0,077 < e_s < 2,212$	18
Trimble	N	$-0,817 < A_s < -0,021$	12	$0,040 < A_s < 0,834$	8	$-0,065$	1	$0,066 < e_s < 2,468$	19
	E	$-0,980 < A_s < -0,052$	6	$0,000 < A_s < 1,323$	14	$-0,868 < e_s < -0,052$	5	$0,290 < e_s < 3,786$	15
	U	$-0,635 < A_s < -0,036$	10	$0,000 < A_s < 0,640$	10	$-0,664 < e_s < -0,067$	4	$0,076 < e_s < 3,010$	16
Topcon	N	$-0,512 < A_s < -0,048$	13	$0,022 < A_s < 0,587$	13	$-1,299 < e_s < -0,194$	4	$0,070 < e_s < 1,862$	22
	E	$-0,933 < A_s < -0,010$	7	$0,085 < A_s < 0,928$	19	$-1,344 < e_s < -0,017$	5	$0,144 < e_s < 2,790$	21
	U	$-0,559 < A_s < -0,003$	12	$0,085 < A_s < 0,561$	4	$-1,377 < e_s < -0,052$	4	$0,001 < e_s < 2,773$	22

Зауважимо, що обчислені довірчі інтервали для асиметрії в цілому для більшості складових топоцентричних координат референцих станцій покривають нуль, що означає підтвердження гіпотези $A=0$. Довірчі інтервали для ексцесу відповідних складових координат знаходяться у додатній області, що означає підтвердження гіпотез: $e > 0$.

Для цього випадку вагова функція емпіричного розподілу не є сингулярною, тобто оцінка допустима, але розподіл похибок не є ідеальним, оскільки підтверджується дія слабких, не виключених систематичних похибок. Для покращення якості оцінок необхідне наступне наближення для оцінки параметрів математичної моделі з використанням методів НТПВ.

Висновки

На основі аналізу отриманих результатів ми зробили такі висновки:

1. Після фільтрації часових серій на основі програмного пакету iGPS ми отримали зменшення значень СКП для всіх станцій в середньому на 5–15 %. На основі цих значень можна зробити висновок, що вплив невилучених або неправильно змодельованих похибок може суттєво позначитися на результатах спостережень.
2. Аналіз часових серій референцих станцій України на основі високоточних GNSS-вимірювань

не підтвердив гіпотезу про їх підпорядкування нормальному закону розподілу Гаусса.

3. Всі емпіричні характеристики часових серій показують, що розподіл похибок не є досконалим, оскільки підтверджується ефект слабких, неврахованих джерел систематичних похибок.

4. З погляду класичної теорії похибок вимірювань (СЕТМ), вимірювання на станціях задовільні: асиметрія у всіх випадках незначна, а конфіденційні інтервали охоплюють нуль лише у 44 % випадків для північної компоненти, 41 % для східної і 52 % для висотної компоненти.

5. Реальний розподіл похибок вимірювань не підпорядковується нормальному закону розподілу, але відповідає застарілим уявленням класичного закону розподілу похибок.

6. Подальша робота буде направлена на виявлення причин, які спотворюють реальний розподіл, щоб привести його форму до ідеалу, а асиметрію та ексцес до відповідних меж закону Пірсона–Джеффріса VII типу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Двуліт П. Д., Джунь Й. В. (2017). Застосування методів неklasичної теорії похибок для абсолютних вимірювань галілеєвого прискорення. *Геодинаміка: науковий журнал*, 1(22), 7–15. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.007>.
 Джунь И. В. Неклассическая теория погрешностей измерений. Видавничий дім: "Естєро", Рівне. 2015. 168 с.

- Blewitt, G. & Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 107, no. B7, pp. ETG 9–11. <https://doi.org/10.1029/2001JB000570>.
- Dvulit, P. & Dzhun, J. (2019). Diagnostics of the high-precise ballistic measured gravity acceleration by methods of non-classical errors theory. *Geodynamics*, 1(26), 5–16. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.01.005>.
- Dvulit, P., Savchuk, S. & Sosonka, I. (2020). The processing of GNSS observation by non-classical error theory of measurements, *Geodynamics*, 1(28) 19–28. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.01.019>.
- Karaim, M., Elsheikh, M., Noureldin, A., & Rustamov, R. B. (2018). GNSS error sources. *Multifunctional Operation and Application of GPS; Rustamov, RB, Hashimov, AM, Eds*, 69–85. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75493>.
- Herring, T. (2003). MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series. *GPS Solut.*, 7, 194–199. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0068-0>.
- Jiang, W, He, X., Montillet, J.-P., Fernandes, R., Bos, M., Hua, X., Yu, K., et al. (2017). Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, 106, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.01.004>.
- Maciuk, K., Vārna, I. & Xu, C. (2020). Characteristics of seasonal variations and noises of the daily double-difference and PPP solutions. *Journal of Applied Geodesy*, 2021; 15(1): 61–73. <https://doi.org/10.1515/jag-2020-0042>.
- Ostini, L., Dach, R., Meindl, M., Schaer, S., Hugentobler, U. (2008). FODITS: A New Tool of the Bernese GPS Software. In *Proceedings of the 2008 European Reference Frame (EUREF)*, Brussels, Belgium, 18–21 June 2008; Torres, J. A., Hornik, H., Eds.
- Tian Y. (2011). iGPS: IDL tool package for GPS position time series analysis. *GPS Solutions*, 15(3), 299–303. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0219-7>.
- Van Dam, T., J. Wahr, P. C. D. Milly, A. B. Shmakin, G. Blewitt, D. Lavallee, K. M. Larson, (2001). Crustal displacements due to continental water loading, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 651–654.
- Wdowski, S., Y. Bock, J. Zhang, P. Fang, J. Gengrich. (1997). Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 102, 18,057–18,070.
- Williams, S. D. P. (2008). CATS: GPS coordinate time series analysis software. *GPS Solut.*, 12, 147–153. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0086-4>.

Petro DVULIT¹, Stepan SAVCHUK², Iryna SOSONKA³

^{1,2,3} Lviv Polytechnic National University, Institute of Geodesy, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, dvupet@ukr.net, ssavchuk@polynet.lviv.ua, iryna.i.sosonka@lpnu.ua, ¹<https://orcid.org/0000-0003-1803-5116>,

²<https://orcid.org/0000-0002-2475-9666>, ³<https://orcid.org/0000-0002-8740-8687>

METROLOGICAL CHARACTERISTICS DIAGNOSIS OF HIGH-PRECISION GNSS OBSERVATIONS BY METHODS OF NON-CLASSICAL ERROR THEORY OF MEASUREMENTS

The aim of the research is to diagnose the metrological characteristics of high-precision GNSS-observations by methods of non-classical error theory of measurements (NETM) based on Ukrainian reference stations. Methodology. We selected 72 GNSS reference stations, downloaded daily observation files from the LPI analysis center server, and created time series in the topocentric coordinate system. The duration of the time series is almost two years (March 24, 2019 – January 2, 2021). Using a specialized software package, the time series have been cleaned of offsets and breaks, seasonal effects, and the trend component has been removed. Verification of empirical distributions of errors was provided by the procedure of NETM on the recommendations offered by G. Jeffries and on the principles of hypothesis tests the theory according to Pearson's criterion. The main result of the research. It is established that the obtained time series of coordinates of reference GNSS stations do not confirm the hypothesis of their conformity to the normal Gaussian distribution law. NETM diagnostics of the accuracy of high-precision GNSS measurements, which is based on the use of confidence intervals for assessing the asymmetry and kurtosis of a significant sample, followed by the Pearson test, confirms the presence of weak, not removed from GNSS-processing, sources of systematic errors. Scientific novelty. The authors use the possibility of NETM to improve the processing of high-precision GNSS measurements and the need to take into account the sources of systematic errors. Failure to take into account certain factors creates the effect of shifting the time coordinate series, which, in turn, leads to subjective estimates of station velocity, i.e. their geodynamic interpretation. Practical significance. Research of the reasons for deviations of errors distribution from the established norms provides metrological literacy of carrying out high-precision GNSS measurements of large samples.

Key words: Gaussian error laws, Pearson–Jeffries error laws; non-classical error theory of measurements (NETM); GNSS measurements; reference station.

Надійшла 13.10.2021 р.