

УДК 528.482.3

О. В. ЛОМПАС¹, Р. І. ЯХТОРОВИЧ², І. Р. САВЧИН^{3*}¹ Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013² Навчально-наукова лабораторія «Геодезії та геоінформаційних технологій», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013^{3*} Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, ел. пошта savchyn.ih@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОБОВОГО РУХУ ГНСС-СТАНЦІЇ BRGN

Мета. Дослідження добового руху референційної ГНСС-станції BRGN мережі референційних станцій GeoTerrace Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка», за результатами супутникових та лінійно-кутових вимірювань для подальшого виключення таких рухів із геодинамічних спостережень. **Методика.** На початку була створена знімальна основа. Як знімальна основа використано 2 пілони Бережанського геодезичного базису (P1 та P2). Для визначення точних координат даних пунктів проведено вимірювання у статичному режимі за допомогою двочастотних ГНСС-приймачів. Після закінчення сесії спостережень ГНСС-приймачами на пункт P1 встановлено електронний роботизований тахеометр Leica TCRP1201. Паралельно проводилось вимірювання температури та тиску, за якими під час опрацювання обчислено та введено атмосферні поправки. Опрацювання лінійно-кутових (вектор P1–BRGN) та супутникових (вектор P2–BRGN) вимірювань виконано окремо у спеціалізованому програмному забезпеченні Leica Geo Office. Після опрацювання виконано порівняння та аналіз результатів визначеного добового руху референційної ГНСС-станції BRGN двома методами. **Результати.** Запропоновано методику для проведення дослідження добового руху ГНСС-станції із сумісним використанням лінійно-кутових та супутникових вимірювань. За результатами безперервних лінійно-кутових вимірювань тривалістю 25 годин встановлено, що референційна ГНСС-станція BRGN виконує добовий рух у межах 3 мм (у горизонтальній площині). У темну та світлу пору доби рух відбувається у протилежних напрямках. Результати супутникових вимірювань корелюють із результатами, отриманими лінійно-кутовими методами. Проте дисперсія супутникових вимірювань є значно більшою. Це підтверджує те, що, оперуючи лише супутниковими вимірюваннями, дуже складно встановити короткотерміновий рух пункту, а такі вимірювання можна використовувати тільки для контролю та підвищення достовірності та точності отриманих результатів. Велика дисперсія можливо зумовлена спотворенням результатів супутникових вимірювань різними чинниками. Встановлено, що азимут Сонця впливає на напрямок руху пілона референційної ГНСС-станції BRGN. Рух відбувається в протилежну сторону від напрямку на Сонце. Це спричинене різницею температур на освітленій та неосвітленій Сонцем сторонах пілону. Це призводить до прогину пілону в сторону менш нагрітої частини, оскільки метал під час нагрівання розширюється. **Наукова новизна.** Розроблено та апробовано методику дослідження добового руху референційної ГНСС-станції BRGN. Перспективним напрямком подальших досліджень може бути виявлення закономірностей добових рухів інших ГНСС-станцій у різні пори року та розроблення методики їх вилучення із результатів геодинамічних спостережень. **Практична значущість.** Розроблену методику дослідження добового руху референційної ГНСС-станції BRGN можна використовувати для дослідження та прогнозування добових рухів ГНСС-станцій геодинамічних полігонів.

Ключові слова: добовий рух; ГНСС-станція; лінійно-кутові вимірювання; супутникові вимірювання.

Вступ

Кожна ГНСС-станція незалежно від її розміщення піддається впливу довготермінових та короткотермінових рухів. Довготермінові рухи обумовлені проявом чинників геологічного (зсувів, карстових явищ) та сейсмічного характеру (землетрусів, рухів тектонічних плит). Натомість короткотермінові рухи виникають у результаті впливу температури, сонячної радіації, швидкості вітру, кількості опадів, зміною тиску та вологості ґрунту тощо. Велика кількість публікацій присвячена дослідженню довготермінових рухів ГНСС-станцій, на основі яких, у подальшому, визна-

чаються горизонтальні та вертикальні деформації земної кори. Такі дослідження проводились для Болгарії [Georgiev I., 2006], Великобританії [Teferle F.N., 2009], Італії [Devoti R., 2014], Німеччини [Sibylle G., 2006], Польщі [Kowalczyk K., 2006, 2011], України [Висотенко Р., 2010], Швейцарії [Schlunegger F., 2001], а також Піренеїв [Asensio E., 2012], Фенноскандії [Zhao S., 2012] та ін. Аналізуючи наведені публікації, встановлено, що довготермінові рухи ГНСС-станцій можуть коливатися в межах від 0,2 мм/рік до 30 мм/рік і є, в основному, проявом горизонтальних або вертикальних деформацій земної кори.

Короткотермінові рухи ГНСС-станцій переважно характеризують добові коливання об'єктів, на яких вони встановлені: висотні будівлі, опори мостів, дамби гідроелектростанцій тощо. Для прикладу, встановлені на даху (94,6 м) бізнес-вежі «Zagrebrčanka» (Загреб, Хорватія) чотири ГНСС-станції протягом 50 годин безперервних вимірювань зафіксували короткотермінові зміни значень координат пунктів у межах 10 та 14 мм для осей X та Y відповідно, а також зміну висотного положення в межах 21 мм [Grgić I., 2011]. Добова різниця температури становила 12° C, а добова зміна навантаження вежі була близькою до 100 000 кг.

Для моніторингу вантового дерев'яного мосту «Älvsbacka» (Карлстад, Швеція) використано три ГНСС-станції, які встановлені на середині та чвертині мосту, а також на 23-метровій південно-східній опорі мосту. В результаті безперервних супутникових вимірювань протягом 180 годин (7,5 днів) визначено, що середина та чвертина мосту зазнають короткотермінових горизонтальних рухів у інтервалі ± 20 мм та вертикальних рухів у інтервалі ± 50 мм [Saracoglu E., 2013]. За період спостережень температура коливалася в межах від 3 до 16° C, відносна вологість від 35 до 95 %. Максимальна швидкість вітру досягала 16–18 м/с, який був переважно західним. Напрямок та швидкість вітру були основними чинниками, які впливали на горизонтальні рухи. Як показали дослідження короткотерміновими були тільки вертикальні рухи, а поздовжні горизонтальні – переважно довготерміновими. Натомість, у [Wieser A., 2002; Brunner F., 2006] зазначається, що недоречно використовувати тільки ГНСС-метод, оскільки можливі спотворення сигналу ГНСС не дають змоги побачити реальний короткотерміновий рух станцій. Автори пропонують додатково використовувати електронні тахеометри та наводять результати застосування такого сумісного використання для моніторингу 70-метрової А-подібної опори підвісного мосту «Rosenbrücke» (Тулльн-на-Дунаї, Австрія). Максимальне значення коефіцієнту кореляції між вимірюваннями ГНСС та електронного тахеометра дорівнює 0,8 (для 48 годин безперервних вимірювань). Після відсіювання всіх шумів та похибок вимірювань встановлено, що за різниці температур 7° C та швидкості вітру до 20 км/год опора коливається в межах 10 мм.

Представлені публікації розглядають ГНСС-станцію як структурний елемент досліджуваного об'єкта, а тому не розглядають власне рух самого пілона, на якому встановлена ГНСС-антена. На нашу думку, під час дослідження короткотермінових рухів складних об'єктів, таких як висотні будівлі, опори мостів, дамби гідроелектростанцій тощо, доцільно було б окремо розглядати рух об'єкта дослідження та рух пілона з ГНСС-антеною. У праці [Naas R., 2013] наведено результати дослідження стійкості чотирьох різних

ГНСС-пілонів, розміщених на території Космічної Обсерваторії Онсала (Гетеборг, Швеція). Дослідження проводилися двома тахеометрами протягом 3-х місяців із дискретністю вимірювань 5 хвилин. У результаті виявлено добові горизонтальні короткотермінові коливання пілонів у межах 6 мм. На думку авторів, такі коливання є проявом впливу температури та сонячної радіації і вони частково можуть бути зменшені за використання термозахисних екранів.

У статті [Тревого И., 1990] представлено дослідження зв'язку між добовою динамікою геодезичних пунктів, встановлених на висотних будівлях та інтенсивністю сонячної радіації. Дослідження проводилося протягом 14 днів у червні, липні та серпні на пунктах міського геодинамічного полігону, розташованих на 16-поверхових будинках (Кишинів, Молдова). Встановлено, що протягом дослідження найбільшої динаміки зазнавав пункт «Віерул» 14 та 17 мм по осях X та Y відповідно. Слід зазначити, що зміщення координат пунктів чітко корелюють із значеннями прямої сонячної радіації.

Так, відповідно до [Тревого И., 1999], пряма сонячна радіація є важливим фактором короткоперіодичної динаміки геодезичних пунктів на високих спорудах протягом дня. За висоти будівлі ~50 м можна чекати змін координат пунктів у 20 мм і більше залежно від інсоляції стін будівлі, її форми тощо.

У брошурі [Gerhatova L., 2015] представлено дослідження зміщення положення двох ГНСС-антен під впливом нагрівання пілона за допомогою високоточного давача нахилу. Результати дослідження підтверджують вплив зміни температури на положення бетонних стовпів і залежність цих змін від прямих сонячних променів. Для прикладу, нахил встановленого на скельних породах бетонного пілону MOR2 (Модра-Пісок, Словаччина) висотою 3 м та діаметром 1 м досягав $\pm 40''$, а горизонтальні добові короткотермінові коливання досягали 1 мм. А встановлений на даху бетонний пілон SUT1 (Братислава, Словаччина) висотою 1,21 м та діаметром 0,4 м зазнає нахилу $\pm 70''$, що відповідно становить 0,8 мм у горизонтальній площині.

У публікації [Brockmann E., 2013] подано дослідження стабільності двох перманентних ГНСС-станцій, встановлених на 9-метрових металевих фермах. Протягом 10 днів спостережень за максимальних перепадах температури в 25 °C зафіксовано добові короткотермінові горизонтальні коливання в межах 8 мм та вертикальні в межах 2 мм. Добовий короткотерміновий рух досліджуваних станцій описував трикутник. Оскільки ферма була трикутною і напрямок руху збігався із стороною, на яку потрапляли прямі сонячні промені, то можна зробити висновок, що напрямок короткотермінового зміщення також залежить від азимуту Сонця.

Проведений аналіз літературних джерел доводить, що пілони ГНСС-антен піддаються впливу різних короткотермінових коливань, які є проявом впливу зміни температури, прямої сонячної радіації, швидкості вітру, азимуту Сонця тощо. Короткотермінові рухи також залежать від особливостей розміщення пілона, його висоти, товщини та матеріалу, з якого він зроблений. У зв'язку із цим кожен пілон має власні короткотермінові рухи, які потребують дослідження.

Для проведення дослідження короткотермінового руху вибрано референцну ГНСС-станцію BRGN. Це зумовлено тим, що на відстані приблизно 50 метрів від ГНСС-станції розташований Бережанський геодезичний базис, з якого можна проводити вимірювання. Хотілось би зазначити, що ця станція належить до мережі референсних ГНСС-станцій GeoTerrace Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка». Сьогодні ця мережа включає 10 станцій (рис. 1), розміщених на території Львівської, Волинської, Тернопільської та Рівненської областей [Наводич М., 2016].



Рис. 1. Мережа референсних ГНСС-станцій GeoTerrace

Fig. 1. GeoTerrace GNSS-reference stations network

Мета

Дослідження добового руху референсної ГНСС-станції BRGN мережі референсних станцій GeoTerrace Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка», за результатами супутникових та лінійно-кутових вимірювань для подальшого виключення таких рухів із результатів геодинамічних спостережень.

Методика

Для дослідження добового руху референсної ГНСС-станції BRGN запропоновано алгоритм, який подано на рис. 2.

Першим етапом проведення дослідження було створення знімальної основи. Як знімальної основи використано 2 пілони Бережанського геодезичного базису (P1 та P2), які розташовані на відстані близько 50 метрів від референсної ГНСС-станції BRGN (рис. 3).



Рис. 2. Алгоритм для проведення дослідження добового руху референсної ГНСС-станції BRGN

Fig. 2. Algorithm of investigation of daily movement of BRGN GNSS reference station

Для визначення точних координат даних пунктів проведено вимірювання у статичному режимі за допомогою двочастотних ГНСС-приймачів Trimble R7 (P2) та Leica GX1230 (P1), на яких встановлено частоту ресестрації – 1 с та кут відсічки 5°.

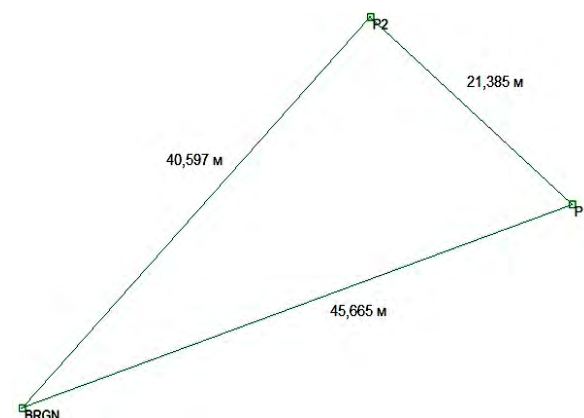


Рис. 3. Схема знімальної основи
Fig. 3. Scheme of reference network

Після закінчення сесії спостережень ГНСС-приймачами, яка тривала 8,5 годин, на пункт P1 встановлено електронний роботизований тахеометр Leica TCRP1201. Протягом 25 годин (з 18:30 24.07.15 до 19:30 25.07.15) із дискретністю 5 хв

тахеометр проводив автоматичні вимірювання на призмові відбивачі 360°, які знаходились під ГНСС-антенами на пунктах BRGN та P2. Паралельно проводилось вимірювання температури та тиску, за якими під час опрацювання обчислено та введено атмосферні поправки.

Опрацювання лінійно-кутових (вектор P1–BRGN) та супутникових (вектор P2–BRGN) вимірювань виконано окремо у спеціалізованому програмному забезпеченні Leica GeoOffice. Після опрацювання виконано порівняння та аналіз результатів визначеного добового руху референційної ГНСС-станції BRGN двома методами.

Результати

У результаті опрацювання статичних супутникових спостережень отримано координати пунктів знімальної основи у системі координат ETRF2000 (табл. 1). За вихідні використано координати референційної ГНСС-станції BRGN, визначені за багаторічний період спостережень.

Таблиця 1

Координати пунктів знімальної основи у ETRF2000

Table 1

Coordinates of the reference network points in ETRF2000

Пункт	X, м	Y, м	Z, м
BRGN	3766420,861	1752407,026	4824042,912
P1	3766385,641	1752438,336	4824043,591
P2	3766382,033	1752419,691	4824053,428

Для порівняння лінійно-кутових та супутникових вимірювань потрібна одна система координат, то дані координати перетворено на систему координат УСК2000. Для перетворення координат із системи ETRF 2000 на УСК2000 використано відомі параметри трансформації, подані в [Савчук С., 2012]. Оскільки об'єкт досліджень знаходиться на краю 6°-ї зони, то задля зменшення спотворень за проекції осьовий меридіан було переміщено у пункт спостережень. У результаті отримано координати пунктів знімальної основи у місцевій системі координат (табл. 2) із осьовим меридіаном у місті Бережани. Отримані координати використано під час опрацювання результатів лінійно-кутових вимірювань.

Таблиця 2

Координати пунктів знімальної основи у місцевій системі координат

Table 2

Coordinates of the reference network points in local system

Пункт	X, м	Y, м	H, м
BRGN	617,758	207,696	315,3667
P1	632,428	250,939	303,7119
P2	647,285	235,557	303,9482

Відповідно до запропонованої методики під час дослідження проводились постійні вимірювання метеорологічних параметрів, а саме температури та тиску. На рис. 4 наведено графік зміни даних параметрів протягом досліджень.

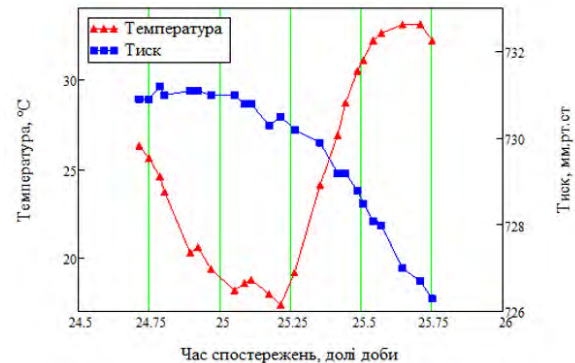


Рис. 4. Зміна температури та тиску протягом періоду досліджень

Fig. 4. Changes of temperature and pressure, during investigation period

Як видно із рис. 4, максимальне значення температури становить 33,1 °C, а мінімальне 17,4 °C. Для тиску ці значення становлять 731,2 мм рт. ст. та 726,3 мм рт. ст. відповідно. Тобто, перепад температури за досліджуваний період становить 15,7 °C, а тиску 4,9 мм рт. ст.

Використовуючи значення вимірюваних метеорологічних параметрів, у лінійні виміри введено атмосферні поправки, значення яких обчислено за відомими формулами [Leica Geosystems AG, 2005].

На рис. 5 подано графік зміни значень атмосферних поправок протягом періоду досліджень.

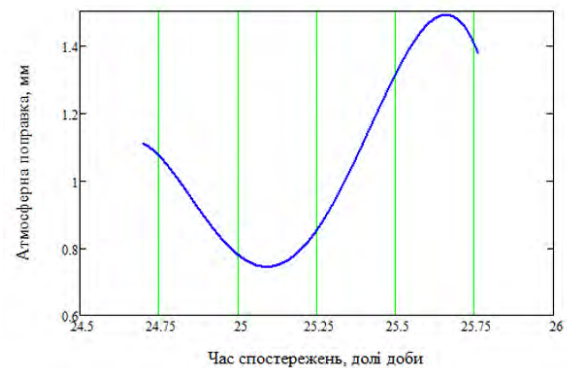


Рис. 5. Зміна значень атмосферних поправок протягом періоду досліджень

Fig. 5. Changes of atmospheric corrections values during investigation period

Подані графіки підтверджують те, що значення атмосферних поправок найбільше залежить від температури (див. рис. 4 та 5). У нашому випадку значення атмосферних поправок не перевищували $\pm 1,5$ мм, що зумовлено короткими довжинами ліній (до 50 метрів).

Після введення атмосферних поправок та опрацювання результатів лінійно-кутових вимірювань отримано значення координат пункту BRGN на кожен момент вимірювання (кожні 5 хвилин). За цими значеннями обчислено відхилення визначених координат від істинних. Істинними вважали координати, визначені за результатами багаторічних спостережень (див. табл. 2). На рис. 6 та 7 подано графіки зміщень референційної ГНСС-станції BRGN по осях X (Північ-Південь) та Y (Схід-Захід) протягом періоду досліджень, отримані із лінійно-кутових вимірювань.

Як видно із даних рисунків, референційна ГНСС-станція BRGN виконує добовий рух у межах 3 мм. Також можна чітко простежити, що в темну та світлу пору доби зміщення відбуваються у протилежних напрямках. Це приводить до думки, що є певна залежність між добовим рухом референційної ГНСС-станції BRGN та положенням Сонця.

Очевидно, зміщення ГНСС-станції можуть бути зумовлені впливом нерівномірного нагрівання пілону (прямими сонячними променями) [Lidberg M., 2007]. На рис. 6 та 7 подано вплив Сонця на зміщення референційної ГНСС-станції BRGN по осях X (Північ-Південь) та Y (Схід-Захід). Тобто, на зміщення по осі X (Північ-Південь) положення Сонця матиме най-

більший вплив, коли буде знаходитися на Півночі або Півдні, а найменший коли буде знаходитися на Сході або Заході. Аналогічно на зміщення по осі Y (Схід-Захід) положення Сонця матиме найбільший вплив, коли знаходитиметься на Сході або Заході, а найменший, коли знаходитиметься на Півночі або Півдні. Для наглядності обчислені зміщення були апроксимовані та представлені поліномом 5-го порядку.

Вплив положення Сонця на горизонтальні зміщення референційної ГНСС-станції BRGN можна представити за допомогою графіку, поданого на рис. 8. Щоб не перевантажувати графік великою кількістю даних, він був побудований за апроксимованими значеннями зміщень референційної ГНСС-станції BRGN. На поданому графіку період спостережень поділено на 7 інтервалів тривалістю по 3–4 години для світлої частини доби та окремий інтервал для ночі. Для цих інтервалів також обчислено та представлено положення Сонця на небесній сфері. Доречно було б зазначити, що для встановлення зв'язку між зміщеннями референційної ГНСС-станції BRGN та азимутом Сонця, усі виміри приведені до шкали місцевого середнього сонячного часу. Цей час відрізняється від поясного (Східноєвропейського літнього часу UTC+3) приблизно на 1,33 години.

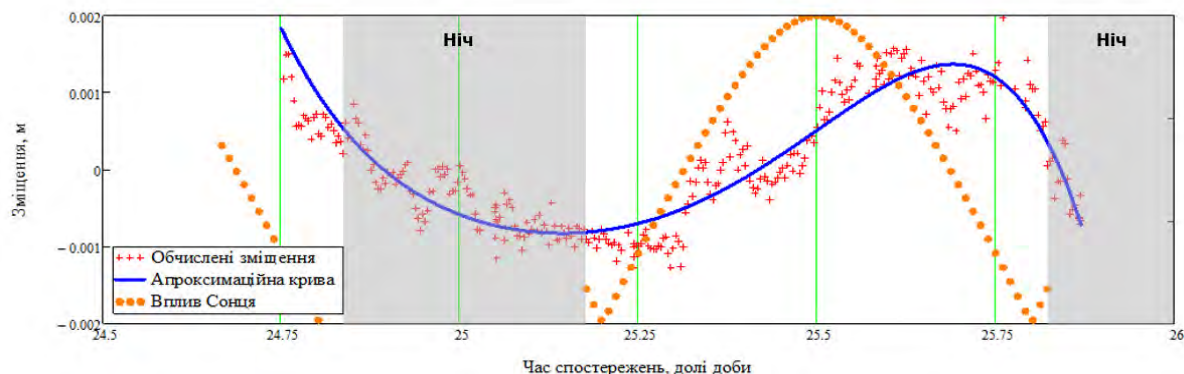


Рис. 6. Зміщення референційної ГНСС-станції BRGN по осі X (Північ-Південь) за результатами лінійно-кутових вимірювань

Fig. 6. Displacement of BRGN GNSS reference station by the X axis (North-South), determined by the results of linear-angular measurements

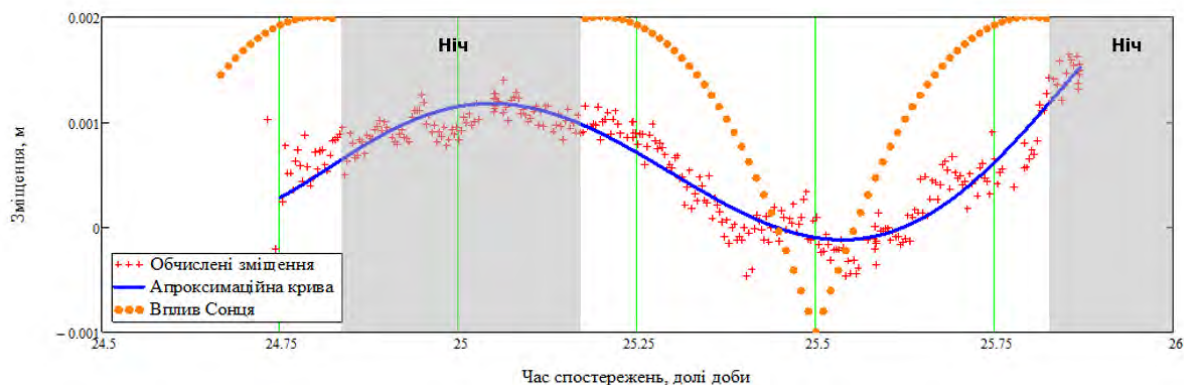


Рис. 7. Зміщення референційної ГНСС-станції BRGN по осі Y (Схід-Захід) за результатами лінійно-кутових вимірювань

Fig. 7. Displacement of BRGN GNSS reference station by the Y axis (East-West), determined by the results of linear-angular measurements

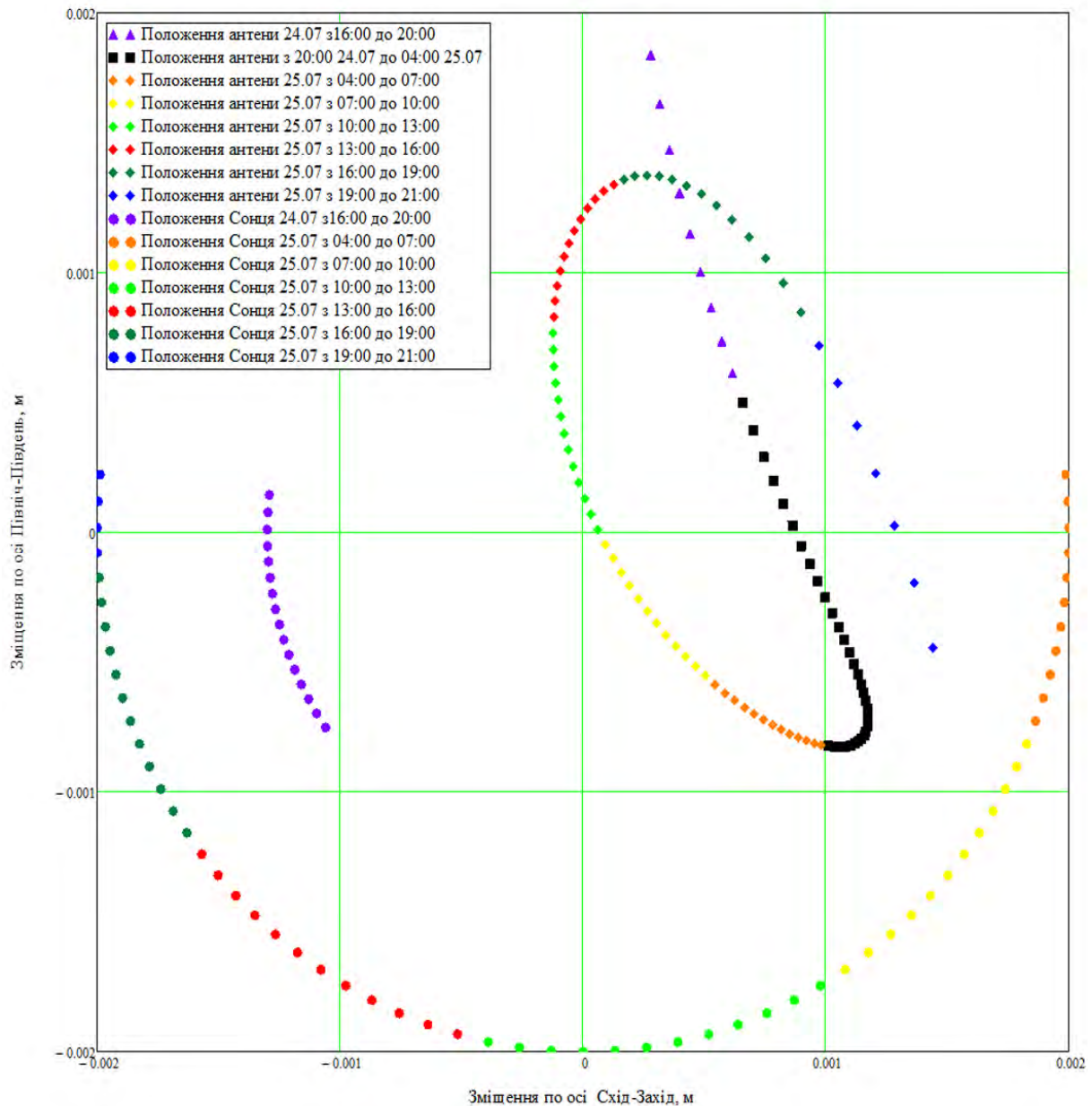


Рис. 8. Вплив положення Сонця на горизонтальні зміщення референційної ГНСС-станції BRGN
Fig. 8. Influence of the Sun position to the horizontal displacements of BRGN GNSS reference station

Аналізуючи представлений графік (рис. 8), можна зробити висновок, що азимут Сонця впливає на напрямок руху пілона референційної ГНСС-станції BRGN. З графіка видно, що рух відбувається в протилежному напрямку від напрямку на Сонце. Оскільки антена референційної ГНСС-станції BRGN встановлена на металевій трубі висотою 1,0 м та діаметром 62 мм, то такий рух спричинений різницею температур на освітлених та неосвітлених Сонцем сторонах пілону. Очевидно, це призводить до прогину пілону в сторону менш нагрітої частини, оскільки метал під час нагрівання розширюється.

Для контролю та підвищення достовірності отриманих результатів на той самий період додатково було опрацьовано вектор P2-BRGN. Для цього файл статичних вимірювань із пункту BRGN було поділено на короткі відрізки інтервалом 20 хвилин та опрацьовано відносно пункту P2. У результаті опрацювання кожного утвореного відрізка було отримано значення координат пункту BRGN на різні моменти вимірювань, наведені до середини інтервалу. На рис. 9 та 10 подано графіки зміщень референційної ГНСС-станції BRGN по осях X та Y протягом періоду досліджень, отримані із лінійно-кутових та супутникових вимірювань.

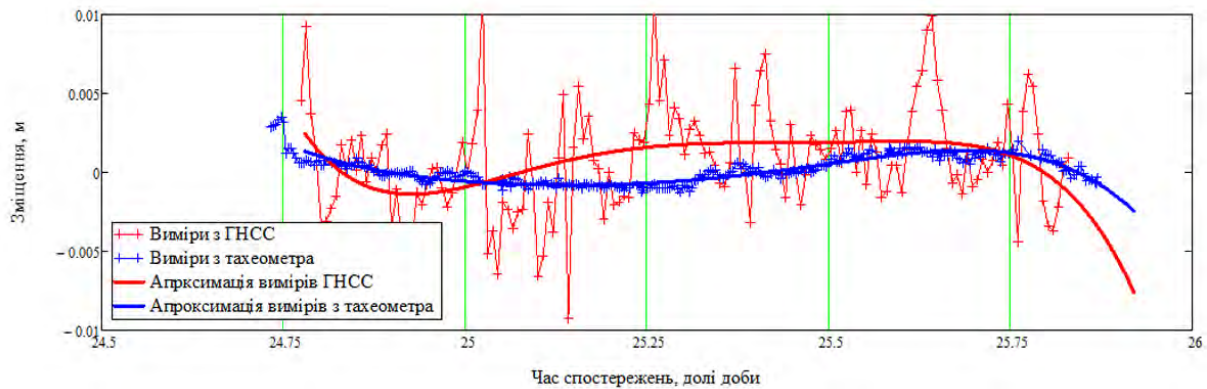


Рис. 9. Зміщення референційної ГНСС-станції BRGN по осі X (Північ-Південь) за результатами лінійно-кутових та супутникових вимірювань

Fig. 9. Displacement of BRGN GNSS reference station by the X axis (North-South), determined by the results of linear-angular and satellite measurements

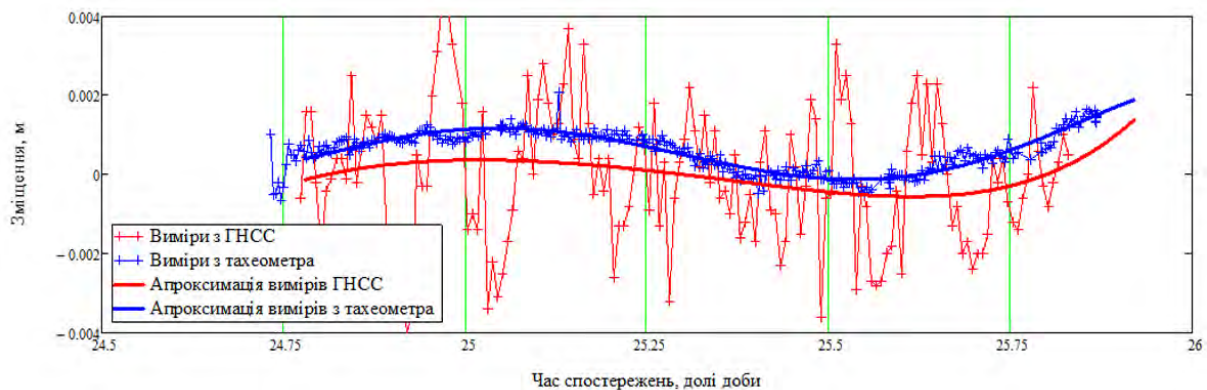


Рис. 10. Зміщення референційної ГНСС-станції BRGN по осі Y (Схід-Захід) за результатами лінійно-кутових та супутникових вимірювань

Fig. 10. Displacement of BRGN GNSS reference station by the Y axis (East-West), determined by the results of linear-angular and satellite measurements

Аналізуючи представлені графіки (рис. 9–10), можна побачити, що дисперсія результатів, отриманих із супутникових вимірів, є значно більшою, ніж із лінійно-кутових. Коливання зміщень референційної ГНСС-станції BRGN по осі X (Північ-Південь), визначених із супутникових вимірювань, відбувається у межах ± 10 мм, по осі Y (Схід-Захід) у межах ± 4 мм. Також можна простежити кореляцію між значеннями зміщень референційної ГНСС-станції BRGN, визначеними із лінійно-кутових та супутникових вимірювань. Значення коефіцієнта кореляції між зміщеннями референційної ГНСС-станції BRGN по осі Y (Схід-Захід), визначеними із лінійно-кутових та супутникових вимірювань, становить 0,94, проте для осі X (Північ-Південь) це значення дорівнює 0,42. Тобто це підтверджує те, що, оперуючи тільки супутниковими вимірюваннями, дуже складно встановити короткотерміновий рух пункту. Як зазначається у [Wieser A., 2002; Brunner F., 2006], це зумовлено спотворенням результатів супутникових вимірювань такими чинниками, як багатопрошляховість, геометрія супутників, тощо. Проте

поєднання лінійно-кутових та супутникових вимірювань забезпечує взаємний контроль та підвищує достовірність і точність отриманих результатів.

Наукова новизна та практична значущість

Розроблено та апробовано методику дослідження добового руху референційної ГНСС-станції BRGN. Цю методику можна використовувати для дослідження та прогнозування добових рухів ГНСС-станцій геодинамічних полігонів.

Перспективним напрямком подальших досліджень може бути виявлення закономірностей добових рухів інших ГНСС-станцій у різні пори року та розроблення методики їх вилучення із результатів геодинамічних спостережень.

Висновки

1. Запропоновано методику для проведення дослідження добового руху ГНСС-станції із сумісним використанням лінійно-кутових та супутникових вимірювань.

2. За результатами безперервних лінійно-кутових вимірювань тривалістю 25 годин встановлено, що референсна ГНСС-станція BRGN виконує добовий рух у межах 3 мм (у горизонтальній площині). В темну та світлу пору доби рух відбуваються у протилежних напрямках.

3. Результати супутникових вимірювань корелюють із результатами, отриманими лінійно-кутовими методами. Проте дисперсія супутникових вимірювань є значно більшою. Це підтверджує те, що оперуючи тільки супутниковими вимірюваннями, дуже складно встановити короткотерміновий рух пункту, а такі вимірювання можна використовувати тільки для контролю та підвищення достовірності точності отриманих результатів. Велика дисперсія можливо зумовлена спотворенням результатів супутникових вимірювань різними чинниками.

4. Встановлено, що азимут Сонця впливає на напрямок руху пілона референсної ГНСС-станції BRGN. Рух відбувається в протилежну сторону від напрямку на Сонце. Це спричинене різницею температур на освітленій та неосвітленій Сонцем сторонах пілону. Очевидно, це призводить до прогину пілону в сторону менш нагрітої частини, оскільки метал під час нагрівання розширюється.

Наведені висновки ґрунтуються на основі 25-годинних безперервних спостережень, проте для підвищення достовірності отриманих результатів та врахування впливу сезонних чинників (температура, тиск, сонячна радіація, вологість, тощо) вважаємо за доцільне продовжити проведення досліджень у цьому напрямку.

Література

- Висотенко Р. Визначення швидкостей зміни координат постійно діючих станцій і періодично діючих пунктів УПМ ГНСС за результатами супутникових геодезичних спостережень 1995–2007 років / Р. Висотенко. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2010. – № 19. – С. 80–86.
- Наводич М. Станція BRGN [Електронний ресурс] / М. Наводич, В. Тарнавський // GeoTerrace. – 2016. – Режим доступу: <http://satnet.lp.edu.ua/station-brgn/>
- Савчук С. Г. Практичні аспекти застосування нової референсної системи УСК2000 / С. Г. Савчук // Міжнародна науково-технічна конференція GEOFORUM. – 2012. – № 17.
- Тревого И. С. Влияние внешней среды на устойчивость пунктов городской геодезической сети / И. С. Тревого. // Геодезия и картография. – 1990. – № 5. – С. 22–26.
- Тревого И. С. Проблемы побудови планових геодезичних мереж в містах та методи їх вирішення: дис. д-ра техн. наук: 05.24.01 / Тревого Ігор Семенович. – Львів, 1999. – 250 с.
- Asensio E., Khazaradze G., Echeverria A., King R. W. and I. Vilajosana., GPS studies of active deformation in the Pyrenees, *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue 2, pp. 913–921, August 2012.
- Brockmann E. GNSS and Tachymetry for Monitoring the stability of Permanent Reference Station / E. Brockmann, D. Ineichen, P. Mahler // Bundesamt für Landestopografie Swisstopo. – 2013.
- Brunner F. Bridge Monitoring: external and internal sensing issues / F. K. Brunner // *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*. – 2006. – P. 693–698.
- Devoti R. GNSS networks for geodynamics in Italy / R. Devoti, G. Pietrantonio, F. Riguzzi // *Física de la Tierra*. – Vol. 26. – 2014. – P. 11–24.
- Displacements of GNSS Antenna Position due to Thermal Bending of Pillar Monument / L. Gerhatova, J. Hefty, J. Papco, M. Minarikova // *Slovak University of Technology in Bratislava*. – 2015.
- Georgiev I. Geodetic monitoring of the recent crustal movements in Southwestern Bulgaria / I. Georgiev, D. Dimitrov, L. Pashova та ін. // *Geosciens*. – 2006. – P. 354–357.
- Grgić I. Experimental Measurements on the Business Tower "Zagrepčanka" / I. Grgić, I. Malović, Z. Kapović // *INGEO 2011 – 5th International Conference on Engineering Surveying*. – 2011. – No. 5. – P. 195–204.
- Haas R. Evaluation of GNSS Monument Stability / R. Haas, S. Bergstrand, W. Lehner // *Reference Frames for Applications in Geosciences* / R. Haas, S. Bergstrand, W. Lehner., 2013. – P. 45–50. DOI: 10.1007/978-3-642-32998-2_8
- Kowalczyk K. New elaboration of gradient map of vertical crustal movements in the territory of Poland / K. Kowalczyk, Ja. Rapiński // *Technical sciences Abbrev.: Techn. Sc.* – 2011. – No. 14(2). – P. 245–254.
- Kowalczyk K. New model of the vertical crustal movements in the area of Poland. *Geodesy and Cartography* / K. Kowalczyk. 2006. – 32. Issue 4. P. 83–87. doi: 10.1080/13921541.2006.9636702
- Leica Geosystems AG. TPS 1200 / Leica Geosystems AG. – Heerbrugg: Copyright Leica Geosystems AG, 2005. – 180 pp. – (User manual). – (Version 1.0).
- Lidberg M. Evaluation of Monument Stability in the SWEPOS GNSS Network using Terrestrial Geodetic Methods – up to 2003 / M. Lidberg, M. Lilje. – Gävle: LANTMÄTERIET, 2007. – 42 pp. – (Reports in Geodesy and Geographical Information Systems).
- Saracoglu E. Short-term monitoring of a cable-stayed timber footbridge / E. Saracoglu, A. Gustafsson, P. Fjellstrom // *International Conference on Timber Bridges*. – 2013. – P. 1–10.
- Schlunegger F. Crustal uplift in the Alps: why the drainage pattern matters / F. Schlunegger, M. Hinderer. – *Terra Nova*. 2001. – C. 425–432.
- Sibylle G., Hans-Ulrich W., Contributions to the Deformation Analysis in Germany Based on Precise and Continuous GPS Measurements, *Natural Hazards*, Vol. 38, Issue 1–2, P. 177–197, May 2006.
- Teferle F. N., Bingley R. M., Orliac E. J., Williams S. D.P., Woodworth P. L., McLaughlin D.,

- Baker T. F., Shennan I., Milne G. A., Bradley S. L. and Hansen D.N., Crustal motions in Great Britain: evidence from continuous GPS, absolute gravity and Holocene sea level data., *Geophysical Journal International*, c 178, Issue 1, P. 23–46, July 2009.
- Wieser A. Analysis of Bridge Deformations using Continuous GPS Measurements / A. Wieser, F. Brunner. // *INGEO 2002 – 2nd Conference of Engineering Surveying.* – 2002. – No. 2. – P. 45–52.
- Zhao S, Lambeck K, Lidberg M., Lithosphere thickness and mantle viscosity inverted from GPS-derived deformation rates in Fennoscandia. *Geophysical Journal International*, Vol. 190, Issue 1, P. 278–292, July 2012.

А. В. ЛОМПАС¹, Р. И. ЯХТОРОВИЧ², И. Р. САВЧИН^{3*}

¹ Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013

² Учебно-научная лаборатория “Геодезии и геоинформационных технологий”, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013

^{3*} Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013 ел, почта savchyn.ih@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СУТОЧНОГО ДВИЖЕНИЯ ГНСС-СТАНЦИИ BRGN

Цель. Исследования суточного движения референцной ГНСС-станции BRGN сети референчных станций GeoTerrace Института геодезии Национального университета «Львовская политехника» по результатам спутниковых и линейно-угловых измерений для дальнейшего исключения таких движений с геодинимических наблюдений. **Методика.** Сначала была создана съемочная основа. В качестве съемочной основы использовано 2 пилон Бережанского геодезического базиса (P1 и P2). Для определения точных координат этих пунктов проведены измерения в статическом режиме с помощью двухчастотных ГНСС-приемников. После окончания сессии наблюдений ГНСС-приемниками на пункт P1 было установлено электронный роботизированный тахеометр Leica TCRP1201. Параллельно проводилось измерение температуры и давления, по которым в процессе обработки было вычислено и введено атмосферные поправки. Обработка линейно-угловых (вектор P1-BRGN) и спутниковых (вектор P2-BRGN) измерений выполнено отдельно в специализированном программном обеспечении Leica GeoOffice. После обработки выполнено сравнение и анализ результатов определенного суточного движения референцной ГНСС-станции BRGN двумя методами.

Результаты. Предложена методика для проведения исследования суточного движения ГНСС-станции с совместным использованием линейно-угловых и спутниковых измерений. По результатам непрерывных линейно-угловых измерений длительностью 25 часов установлено, что референцная ГНСС-станция BRGN выполняет суточное движение в пределах 3 мм (в горизонтальной плоскости). В темное и светлое время суток движение происходит в противоположных направлениях. Результаты спутниковых измерений коррелируют с результатами, полученными линейно-угловыми методами. Однако, дисперсия спутниковых измерений значительно больше. Это подтверждает то, что оперируя только спутниковыми измерениями, очень сложно установить краткосрочное движение пункта, а такие измерения можно использовать только для контроля и повышения достоверности и точности полученных результатов. Большая дисперсия обусловлена искажением результатов спутниковых измерений различными факторами. Установлено, что азимут Солнца влияет на направление движения пилон референцной ГНСС-станции BRGN. Движение происходит в противоположную сторону от направления на Солнце. Это вызвано разницей температур на освещенной и неосвещенной Солнцем сторонах пилон. Можно предположить, что это приводит к прогибу пилон в сторону менее нагретой части, поскольку металл при нагревании расширяется. **Научная новизна.** Разработана и апробирована методика исследования суточного движения референцной ГНСС-станции BRGN. Перспективным направлением дальнейших исследований может быть выявление закономерностей суточных движений других ГНСС-станций в разное время года и разработка методики их исключения из результатов геодинимических наблюдений. **Практическая значимость.** Разработанная методика исследования суточного движения референцной ГНСС-станции BRGN можно использовать для исследования и прогнозирования суточных движений ГНСС-станций геодинимических полигонов.

Ключевые слова: суточное движение; ГНСС-станция; линейно-угловые измерения; спутниковые измерения.

О. В. ЛОМПАС¹, Р. И. ЯХТОРОВИЧ², И. Р. САВЧИН^{3*},

¹ Department of Higher Geodesy and Astronomy of Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013

² Educational and Scientific Laboratory Geodesy and Geoinformation Technology of Lviv Polytechnic National University, 12, Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013

^{3*} Department of Higher Geodesy and Astronomy of Lviv Polytechnic National University, 12, Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013 e-mail: savchyn.ih@gmail.com

RESEARCH OF DAILY MOVEMENT OF BRGN REFERENCE STATION

Purpose. Investigation of daily movement of GNSS station BRGN of GeoTerrace reference network of Institute of geodesy Lviv Polytechnic National University, by the results of GNSS and linear-angular

measurements in order to exclude such movements of geodynamic observations. **Methodology.** At first step reference network have been created. It included 2 pillars of Beregany geodetic base line (P1, P2). For determination of precise coordinates of these pillars, static GNSS observations were done with use of double frequency receivers. After finalizing of session of GNSS observations, precise robotic total station Leica TCRP1201 was installed on the point P1. In parallel, temperature and pressure measurements were conducted, and atmospheric corrections were determined on the processing stage. Processing of linear-angular (baseline P1–BRGN) and satellite measurements (P2–BRGN) was done in specialized software Leica Geo Office. After data processing comparison and analysis of the results of daily station movement of BRGN reference station have been done, two methods were used for this purpose. **Results.** Methodic of daily movement of GNSS station is proposed with joint usage of linear-angular and satellite measurements. By the results of permanent linear-angular measurements by the duration of 25 hours are determined that station BRGN is moving within 3 mm in horizontal plane. During the dark and daytime movement is going to the different directions. Results of satellite observations are correlated with the results of linear-angular measurements. However, dispersion of satellite measurements is much higher. This confirms that short-term station movement is very complicated to be determined using only satellite observations, and this kind of measurement can be used only as control measurements. High dispersion may be caused, by the satellite observations distortion due to different factors. Is determined that Sun azimuth has influence to the direction of BRGN pillar movement. Movement is going to opposite direction from the direction to the Sun. It caused by the temperature difference on the lighted and unlighted, by the Sun, parts of pillar. Obviously it leads to the deflection of the pillar aside to the less heated part of pillar, because metal during the heating is expanding. **Originality.** By the results of investigation, the methods of daily reference station movement determination is developed and approved. One promising avenue for further research might identify patterns of daily reference station movement in different seasons and develop techniques to exclude the results of geodynamic observations. **Practical significance.** The developed methods of daily reference station movement determination can be used for investigation and prognoses of daily GNSS stations movements of geodynamic polygons.

Key words: daily movement; GNSS station; linear-angular measurements; satellite measurements.

REFERENCES

- Vysotenko R. *Vyznachennja shvydkostej zminy koordynat postijno dijuchykh stancij i periodychno dijuchykh punktiv UPM GhNSS za rezul'tatamy suputnykovykh gheodezychnykh sposterezhenj 1995–2007 rokiv* [Determining the rate of velocities of permanent stations, and periodically existing settlements UPN GNSS based on satellite geodetic measurements 1995–2007 period]. *Modern achievements in geodetic science and industry [Suchasni dosjaghnennja gheodezychnoji nauky ta vyrobnyctva]*. 2010, No. 19, pp. 80–86.
- Navodych M. *Stancija BRGN* [GNSS Station BRGN]. *GeoTerrace*, 2016. Available at: URL: satnet.lp.edu.ua/station-brgn/ (Accessed 09 Januar 2016)
- Savchuk S. G. *Praktychni aspekty zastosuvannja novoi' referencnoi' systemy USK2000* [Practical aspects of implementing a new reference system USK2000]. Javoriv. Mizhnarodna naukovu-tehnicna konferencija GEOFORUM [International Scientific Conference GEOFORUM], 2012, No. 17.
- Trevoho I. S. The problems of geodetic network construction in a city and methods to solve them. Dis. Doc.: 05.24.01, Lviv, 1999, 250 p.
- Trevoho I. S. *Vlijanie vneshney sredy na ustoychivost punktov gorodskoy geodezicheskoy seti* [The impact of the environment on the stability of the city points of geodetic network]. *Geodesy and Cartography*, 1990, Vol. 5, pp. 22–26.
- Asensio E., Khazaradze G., Echeverria A., King R. W. and I. Vilajosana., GPS studies of active deformation in the Pyrenees. *Geophysical Journal International*, 2012, Vol. 190, issue 2, pp. 913–921.
- Brockmann E., Ineichen D., Mahler P. GNSS and Tachymetry for Monitoring the stability of Pemanent Reference Station. *Bundesamt fur Landestopografie Swisstopo*, 2013.
- Brunner F. K. Bridge Monitoring: external and internal sensing issues. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, 2006, pp. 693–698.
- Devoti R., Pietranonio G., Riguzzi F. GNSS networks for geodynamics in Italy. *Física de la Tierra*, 2014, Vol. 26, pp. 11–24.
- Gerhatova L., Hefty J., Papco J., Minarikova M. Displacements of GNSS Antenna Position due to Thermal Bending of Pillar Monument. *Slovak University of Technology in Bratislava*, 2015.
- Georgiev I., Dimitrov D., Pashova L. Geodetic monitoring of the recent crustal movements in Southwestern Bulgaria, *Geosciens*, 2006, pp. 354–357.
- Grgić I., Malović I., Kapović Z. Experimental Measurements on the Business Tower "Zagrepčanka", *INGEO 5th International Conference on Engineering Surveying*, 2011, No. 5, pp. 195–204.
- Haas R., Bergstrand S., Lehner W. Evaluation of GNSS Monument Stability. *Reference Frames for Applications in Geosciences*, 2013, pp. 45–50. doi: 10.1007/978-3-642-32998-2_8.
- Kowalczyk K., Rapiński Ja. New elaboration of gradient map of vertical crustal movements in the territory of Poland. *Technical sciences Abbrev.: Techn. Sc*, 2011, No. 14(2), pp. 245–254.

- Kowalczyk K. New model of the vertical crustal movements in the area of Poland. *Geodesy and Cartography*, 2006, issue 4, pp. 83–87. doi: 10.1080/13921541.2006.9636702.
- Leica Geosystems AG. TPS 1200. *Leica Geosystems AG. – Heerbrugg: Copyright Leica Geosystems AG*, 2005, pp. 180 – (User manual). – (Version 1.0).
- Lidberg M., Lilje M. Evaluation of Monument Stability in the SWEPOS GNSS Network using Terrestrial Geodetic Methods-up to 2003. *Gävle: LANTMÄTERIET*, 2007. pp. 42 – (Reports in Geodesy and Geographical Information Systems).
- Saracoglu E., Gustafsson A., Fjellstrom P. Short-term monitoring of a cable-stayed timber footbridge. *International Conference on Timber Bridges*, 2013, pp. 1–10.
- Schlunegger F., Hinderer M. Crustal uplift in the Alps: why the drainage pattern matters. *Terra Nova*, 2001, pp. 425–432.
- Sibylle G., Hans-Ulrich W. Contributions to the Deformation Analysis in Germany Based on Precise and Continuous GPS Measurements. *Natural Hazards*, 2006, Vol. 38, issue 1–2, pp. 177–197.
- Teferle F. N., Bingley R. M., Orliac E. J., Williams S. D. P., Woodworth P. L., McLaughlin D., Baker T. F., Shennan I., Milne G. A., Bradley S. L. and Hansen D. N. Crustal motions in Great Britain: evidence from continuous GPS, absolute gravity and Holocene sea level data. *Geophysical Journal International*, 2009, issue 1, pp. 23–46.
- Wieser A., Brunner F. Analysis of Bridge Deformations using Continuous GPS Measurements. *INGEO 2nd Conference of Engineering Surveying*, 2002, No. 2, pp. 45–52.
- Zhao S, Lambeck K, Lidberg M. Lithosphere thickness and mantle viscosity inverted from GPS-derived deformation rates in Fennoscandia. *Geophysical Journal International*, 2012, Vol. 190, issue 1, pp. 278–292.

Надійшла 26.01.2016 р.