

¹ Кафедра автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель, Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”, просп. Першотравневий, 24, Полтава, 36011, Україна, ел. пошта:

NesterenkoS2208@gmail.com, rom2014rom2014@gmail.com ^{1*} <http://orcid.org/0000-0002-2288-3524>,

¹ <http://orcid.org/0000-0003-1027-0541>

² Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України, вул. Мясоедова, 27/29, Полтава, 36014, Україна, ел. пошта: vgpavlyk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6389-0758>

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.046>

АНАЛІЗ ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ПЕРМАНЕНТНОЇ ГНСС-СТАНЦІЇ POLV НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ТА НІВЕЛЮВАННЯ

Метою роботи є аналіз результатів дослідження динаміки вертикальних рухів перманентної станції системи позиціонування ГНСС “Полтава” (ідентифікатор POLV). Методика. На території Полтавської гравіметричної обсерваторії розбитий геодинамічний полігон. Він включає репери з відомими показниками стійкості, які закладені на різній глибині. На репері А1, який відзначається високою стійкістю впродовж 30 років спостережень, встановлено точний нівелір Н-05. ГНСС-станція, вертикальні рухи якої досліджувалися, розташована на спеціально збудованому постаменті на внутрішній капітальній стіні лабораторного корпусу Полтавської гравіметричної обсерваторії Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України. Динаміку руху базової станції спостерігали за марками, закладеними на краях західної та східної сторін лабораторного корпусу. Для оцінки й порівняння отриманих результатів виконана обробка супутникових даних методом апроксимації поліноміального згладжування третього ступеню. За результатами періодичного геометричного нівелювання встановлено, що за період 2004–2019 рр. повільні вертикальні рухи марок становили 1,03–1,11 мм з середньорічною швидкістю підняття 0,065–0,07 мм/рік. Сезонні вертикальні рухи перманентної ГНСС-станції POLV – в межах 2 мм/рік, причому в першому півріччі спостерігається підняття пункту, а в другому – його опускання. Виділені складові, що можуть впливати на вертикальні рухи ГНСС-станції, яка встановлена на інженерну споруду. Порівняння результатів наземними і супутниковими спостереженнями здійснено за періоди 2004–2005 рр. і 2018–2019 рр. На основі виконаних спостережень та моделювання складова вертикальних коливань приймальної антени, отримана у період 2004–2005 рр. і наземними, і супутниковими методами, не перевищувала 2 мм; у період 2018–2019 рр. аналіз супутникових даних показав збільшення коливань до 7 мм, це можна пояснити високим розкидом супутникових вимірювань. Наукова новизна та практична значущість полягають у виявленій стабільності амплітуди вертикальних рухів ГНСС-станції “Полтава” (ідентифікатор POLV), що підтверджено наземним методом геометричного нівелювання і аналізом часових рядів супутникових спостережень. Виконані дослідження підтверджують вплив різних чинників на стійкість приймальних антен.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), постійно діючі (перманентні) станції, приймальні антени, вертикальні зміщення, геометричне нівелювання, дані супутникових спостережень.

Вступ

На сьогодні в Україні існує наростаюча потреба в розгортанні мережі перманентних референціальних ГНСС-станцій, що цілодобово накопичують дані з необхідними характеристиками точності (position, navigation and timing – PNT). Високоточне координатно-часове забезпечення значної частки геодезичних, землепорядних та інших робіт із застосуванням ГНСС-технологій суттєво підвищує ефективність та темпи їх виконання. Наявність у будь-якому регіоні мережі ГНСС-станцій дає змогу забезпечити централізовану інформаційну підтримку геодезичних робіт користувачів на всій терито-

рії регіону. За цього в зоні покриття мережі користувачі отримують можливість досягнення сантиметрової точності під час використанні одного геодезичного приймача супутникових навігаційних сигналів. Східний регіон України особливо мало забезпечений пунктами. Наявні базові станції потребують високоточних характеристик. Необхідна постійна перевірка зміщень приймальних антен, виявлення чинників, які можуть впливати на стійкість станцій перманентної мережі, а отже, і на точність визначення їх місця розташування. Приймальні антени ГНСС-апаратури розташовують на спорудах, будівлях, спеціальних постаментах, фундаменти

яких часто перебувають у зоні значних деформацій ґрунту під дією варіації гідротермічних чинників. Це може спотворювати (викривляти) отримані результати моніторингу земної поверхні і поставити під сумнів достовірність їх інтерпретації [Павлик та ін., 2020]. Такий моніторинг результативний, коли для перевірки використовують і наземні геодезичні методи, і супутникові спостереження. Для дослідження вертикальних зміщень обрана ГНСС-станція POLV, яка включена до мереж IGS та EPN.

Мета

Метою роботи є аналіз результатів дослідження динаміки вертикальних рухів перманентної станції системи позиціонування ГНСС “Полтава” (ідентифікатор POLV).

Методика досліджень

На території Полтавської гравіметричної обсерваторії розбитий геодинамічний полігон. Він включає репери з відомими показниками стійкості, які закладені на різній глибині. На репері А1, який відзначається високою стійкістю впродовж 30 років спостережень, встановлено точний нівелір Н-05. ГНСС-станція, вертикальні рухи якої досліджувалися, встановлена на спеціально збудованому постаменті на внутрішній капітальній стіні лабораторного корпусу Полтавської гравіметричної обсерваторії Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України. Динаміку руху базової станції спостерігали за марками, закладеними на краях західної та східної сторін лабораторного корпусу. Для оцінки й порівняння отриманих результатів виконана обробка супутникових даних методом апроксимації поліноміального згладжування третього ступеню.

На сьогодні в Україні встановлено більше ніж 410 активних станцій спостережень ГНСС, які належать різним операторам. До найвідомішої мережі належить УПМ ГНСС (UAPOS – Українська мережа постійно діючих станцій спостережень глобальних навігаційних супутникових систем). 9 станцій належать до European Permanent Network (EPN), а 7 – до International GNSS Service (IGS) Міжнародної служби ГНСС. Відомо, що українська мережа

перманентних ГНСС-станцій створена з метою підвищення точності геодезичних вимірювань на території України та прив’язки координатної системи до Міжнародної земної системи відліку ITRF. УПМ ГНСС покликана вирішувати науково-технічні завдання найвищої точності, забезпечити користувачів, які працюють у сфері геодезії та землеустрою, можливістю практичного отримання координат будь-якої доступної точки на земній поверхні чи у навколишньому просторі з достатньою точністю (в сантиметрах) та оперативністю (в секундах/хвилинах).

УПМ ГНСС на сьогодні включає: постійно діючі станції спостережень глобальних навігаційних супутникових систем, на яких безперервно проводяться комплексні супутникові, геодезичні, гравіметричні та геофізичні спостереження; періодично діючі станції спостережень глобальних навігаційних супутникових систем, на яких не рідше одного разу на п’ять років проводяться комплексні супутникові, геодезичні, гравіметричні та геофізичні спостереження; центри оброблення інформації (Центр геодезичних досліджень Науково-дослідного інституту геодезії і картографії, Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук та Центр контролю навігаційного поля ДКА).

В Україні великого розвитку набули й інші мережі: ГАО НАНУ (Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України), НДІГК (Науково-дослідний інститут геодезії і картографії), SCNSU (система космічного навігаційно-часового забезпечення України), Geoterrace (мережа GNSS Інституту геодезії Національного університету “Львівська політехніка”), ZAKPOS (Transcarpathian Position Determination System – мережа референцих GNSS станцій), ТНТ–ТІІ GNSS Network (мережа активних референцих станцій компанії “TNT TPI”), System.NET (мережа GNSS ПрАТ “System Solutions”), NGS NET (регіональна система високоточних геодезичних вимірювань в Харківській області). Станції обладнані апаратурою фірм Leica, GPS COM, Trimble, TOPCON [ГНСС група ГАО НАН України]. Антени дають змогу приймати сигнали GPS-супутників (США), Galileo (ЄС), GLONASS (Росія), BeiDou (Китай).

Якщо складовими частинами кожної відлікової основи є фізичні точки (станції), то ключовими інструментами у підтримці International Terrestrial Reference System є мережа перманентних станцій IGS, а для European Terrestrial Reference System 1989 – це мережа перманентних станцій EUREF – EPN.

На сьогодні близько 200 організацій, що займаються збором ГНСС-даних з базових станцій по всьому світу, об'єднані в IGS (International GNSS Service), яка, своєю чергою, належить до Міжнародної асоціації геодезії. Центри обробки даних та аналізу IGS: Природні ресурси Канади EMR (Канада), Уханський університет WHU (Китай), Геодезична обсерваторія Печни GOP RIGTC (Чехія), Космічне агентство CNES GRG (Франція), Європейське космічне агентство ESA/ESOC (Німеччина), GeoForschungsZentrum GFZ (Німеччина), Європейський центр визначення орбіт CODE (Швейцарія), Лабораторія реактивного руху JPL (США), Массачусетський технологічний інститут MIT (США), Національна геодезична служба NGS (США), Інститут океанографії імені Скриппса SIO (США), Американська морська обсерваторія USNO (США). Основою IGS є глобальна мережа з понад 400 перманентних станцій, що відстежують сигнали GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou у комплексі з космічними (WAAS, EGNOS, MSAS і ін.), наземними й автономними бортовими функціональними доповненнями [Нестеренко, 2021].

Європейська мережа перманентних станцій EPN (European Permanent Network) є добровільним об'єднанням більше 100 університетів, науково-дослідних інститутів і комерційних установ у більш ніж 30 європейських країнах. Частиною Європейської мережі перманентних станцій є більше 300 постійно діючих ГНСС-станцій, центри обробки даних, що забезпечують доступ до даних станцій, аналітичні центри, які аналізують дані ГНСС, центри або координатори, що генерують продукцію EPN, і Центральне бюро, яке відповідає за щоденний моніторинг та управління EPN. Мережа функціонує під егідою підкомісії IAG (Міжнародної асоціації геодезії) Регіональної довідкової комісії для Європи EUREF [EUREF Permanent GNSS Network].

Дослідження динаміки змін координат перманентних супутникових станцій має особливе значення і в контексті вдосконалення реалізації земної системи координат, і з огляду на необхідність вивчення фізичних явищ, які зумовлюють ці зміни [Третяк та ін., 2012; Янків-Вітковська, 2011; Савчук та ін., 2019]. Вчені займаються розробкою методики визначення рухів опорної станції, прогнозуванням і побудовою моделей переміщень й деформацій, виявленням чинників, які впливають на динаміку базових станцій [Ломпас та ін., 2016; Павлик, 2020; Dong, et al., 2002; Gulal, et al., 2013; Isawi, et al., 2022]. Завдання авторів статті – визначити амплітуди вертикальних рухів ГНСС-станції POLV.

Результати досліджень

Перманентна (постійна) станція системи позиціонування ГНСС “Полтава” (ідентифікатор POLV) організована у 2001 р. на території Полтавської гравіметричної обсерваторії Інституту геофізики імені С. І. Суботіна НАН України. Після початку регулярних спостережень станція POLV була включена до мереж IGS (червень 2001 р.) та EPN (вересень 2001 р.). Приймальна антена встановлена на спеціально збудований постамент, який розташований на внутрішній капітальній стіні лабораторного корпусу обсерваторії (рис. 1). Будівля збудована більше ніж 100 років тому; висота приймальної антени над поверхнею землі становить 10,6 м.



Рис. 1. Місце встановлення ГНСС-станції “Полтава” (POLV).

Джерело: [архівне фото авторів]

Як основний метод наземних геодезичних спостережень було застосовано метод повторного геометричного нівелювання [Lyon, et al., 2018]. На території обсерваторії розбитий геодинамічний полігон з метою дослідження впливу екзогенних чинників метеорологічного походження на динаміку земної поверхні, закладені реperi різної глибини з відомими показниками стійкості. На відстані 75 м від станції знаходиться репер А1 глибиною 6 м, який відзначається високою стійкістю впродовж усіх 30 років спостережень. У динаміці цього знаку відсутні повільні та сезонні рухи. Саме цей репер вибрано як вихідний під час визначення характеристик можливої вертикальної динаміки приймальної антени ГНСС-станції.

У 2004–2005 рр. виконано перші спостереження за локальними вертикальними рухами станції під дією варіації гідротермічних чинників. Для цього на краю західної та східної сторін будівлі обсерваторії було закладено дві марки з нержавіючої сталі з нанесеними поділками, вертикальне положення яких постійно контролювалось методом повторного геометричного нівелювання (рис. 2, а). На основі виконаних спостережень та моделювання отримано сезонну складову можливих вертикальних коливань приймальної антени, величина якої не перевищувала 2 мм. Малий період спостережень не дозволив встановити наявність чи відсутність повільних вертикальних рухів ГНСС-станції під дією зовнішніх чинників, тому у 2018 р. Продовжено спостереження за стійкістю станції з метою визначення швидкості її повільних локальних вертикальних рухів та підтвердження отриманих раніше сезонних коливань.

Нівелірні марки, які закладені у 2004 р. на будівлі обсерваторії і використовувались для визначення динаміки, були недостатньо контрастними, що створювало певні труднощі під час спостережень. У 2018 р. на краях будівлі встановлену іншу пару марок, яка розташована приблизно на 1 м нижче за попередню (рис. 2, б). Відносна висота марок змінилась внаслідок зміни конфігурації висотної мережі. Зараз нівелювання нових марок здійснюється з двох станцій, а не з однієї, як це було у 2004–2005 рр. Збільшення кількості станцій нівелювання у 2018–2019 рр. не збільшило похибку визначення

висотного положення марок, а навпаки її зменшило. Це відбулось завдяки значному зменшенню похибки наведення на контрастні штрихи нових марок, порівняно зі старими.

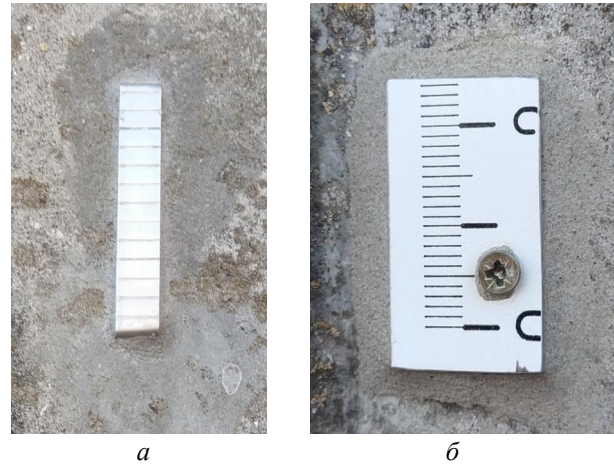


Рис. 2. Марки, закладені на стіні будівлі обсерваторії, для спостережень за вертикальними рухами станції: а – у 2004–2005 рр.; б – у 2018–2019 рр.

Джерело: [архівне фото авторів]

Оскільки загальна кількість спостережень за два роки є порівняно незначною і вони виконувались несиметрично впродовж року, то для надійнішого визначення кількісних характеристик їх вертикальних рухів отримано їх середній рух за два роки визначень. На рис. 3 показано вертикальні рухи марок W і E, які відповідно розташовані на західній та східній сторонах будівлі обсерваторії.

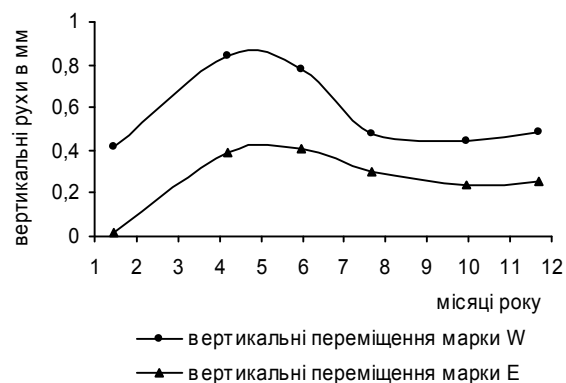


Рис. 3. Середній сезонний вертикальний рух марок W і E за 2018–2019 рр. відносно репера А1

Обидві марки здійснюють паралельний сезонний вертикальний рух, який добре коре-

люється з рівнем ґрунтових вод та сезонними варіаціями вологи ґрунту, що підтверджує рис. 4.

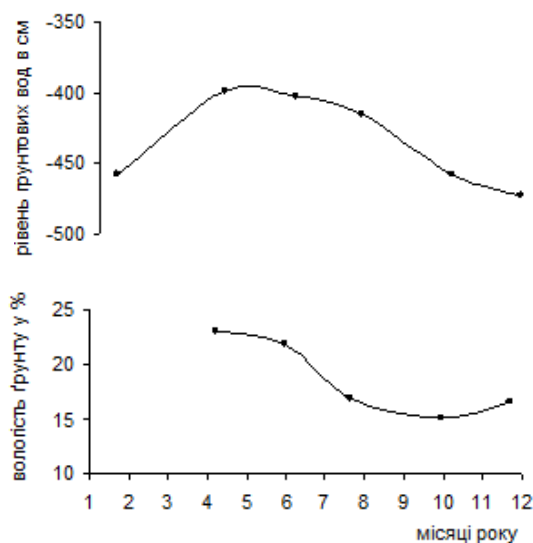


Рис. 4. Середні коливання рівня ґрунтових вод та вологи ґрунту за 2018–2019 рр. на ГП у Полтаві

Рівень ґрунтових вод визначався у підвалі будівлі обсерваторії, а вологість ґрунту поблизу розташування репера А1 в моменти спостережень нівелірних марок W і E.

Розглянуто окремі складові, які зумовлюють вертикальні коливання марок. Це сезонні лінійні температурні розширення наземної $h_{0-1,55}$ (1,55 м – середня висота марок над поверхнею землі) та підземної частини будівлі h_{0-15} (приймаємо, що сезонні зміни температури ґрунту відбуваються до глибини 15 м від поверхні землі), температурні деформації вихідного репера А1 $h_{0,5-6(A1)}$ і ґрунту нижче його основи до прийнятої глибини 15 м $h_{6-15(A1)}$, а також вертикальні рухи фундаменту будівлі внаслідок періодичних коливань вологи ґрунту h_{ϕ} , про що свідчить рис. 5. Тоді, середній вертикальний рух нівелірних марок W і E h_M в будь-який момент часу можна представити таким чином:

$$h_M = h_{0-1,55} + h_{0-15} + h_{\phi} - h_{0,5-6(A1)} - h_{6-15(A1)}. \quad (1)$$

Раніше отримано емпіричну формулу [Павлик, 2013], яка дає змогу вирахувати температуру ґрунту T_z на ГП у Полтаві у будь-який момент часу на будь-якій глибині z від поверхні землі:

$$T_z = T_0 + 15,0e^{-0,380z} \cos(0^{\circ},986t - 194^{\circ},0 - 20,6^{\circ}z), \quad (2)$$

де T_0 – середньорічне значення температури; t – дні року починаючи з 1 січня.

За допомогою формули (2) можна вирахувати усі доданки формули (1) крім h_{ϕ} . На рис. 5 показано сезонні коливання середнього вертикального положення нівелірних марок з вилученими деформаціями вихідного репера та ґрунту під його монолітом та можливий вертикальний рух фундаменту, на якому розміщена ГНСС-станція згідно з формулою (1).

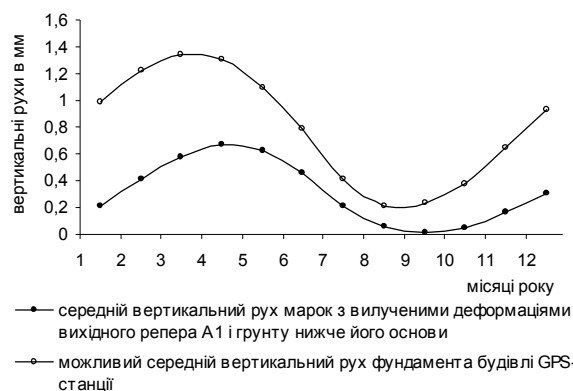


Рис. 5. Середній сезонний вертикальний рух фундаменту будівлі ГНСС-станції за 2018–2019 рр.

Глибина фундаменту будівлі обсерваторії є невідомою, оскільки вона збудована більше сотні років назад. На ГП у Полтаві тривалий час визначаються сезонні вертикальні рухи шарів ґрунту в діапазоні від поверхні землі до глибини 2,5 м. Найкраще ймовірний вертикальний рух фундаменту будівлі з ГНСС-приймачем (рис. 5) описує шар ґрунту на глибині 0,9–1,2 м від поверхні. На рис. 6 зображено середній за 2018–2019 рр. сезонний хід цих двох величин.

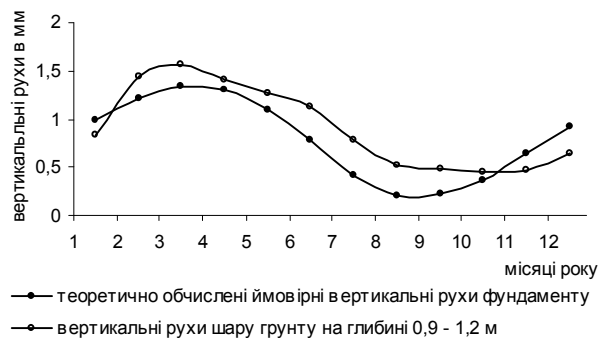


Рис. 6. Середні сезонні вертикальні рухи фундаменту будівлі, де розташований ГНСС-приймач, та шару ґрунту на глибині 0,9–1,2 м від поверхні землі за 2018–2019 рр.

Отримати змодельовані сезонні вертикальні рухи приймальної антени ГНСС-станції h_{GPS} в

будь-який момент часу t_i можна з такого простого виразу:

$$(h_{GPS})_i = (h_M)_i - (h_{0-1,55})_i - h_{(0,5-6)A1} - h_{(6-15)A1} + (h_{\delta yd})_i + (h_{nocm})_i, \quad (3)$$

де $(h_M)_i$ – вертикальні переміщення ГНСС-станції до середньої висоти марок W і E в момент часу t_i , які отримано за результатами їх повторного нівелювання; $(h_{0-1,55})_i$ – вертикальні переміщення зовнішньої стіни будівлі від поверхні землі до середнього положення нівелірних марок на висоті 1,55 м; $(h_{\delta yd})_i$ – вертикальні переміщення ГНСС-станції внаслідок температурних деформацій капітальної стіни всередині будівлі, на якій встановлено постамент антени в момент часу t_i ; $(h_{nocm})_i$ – вертикальні переміщення ГНСС-станції внаслідок температурних деформацій постаменту антени в момент часу t_i :

$$(h_{\delta yd})_i = \alpha L_{\delta yd} (T_{\delta yd})_i, \quad (4)$$

$$(h_{nocm})_i = \alpha L_{nocm} (T_{nocm})_i, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення цегляної кладки ($\alpha=5,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$); $L_{\delta yd}$ і L_{nocm} – відповідно висота капітальної стіни, на якій розміщено постамент антени, і висота самого постаменту над капітальною стіною ($L_{\delta yd} = 6,05$ м, $L_{nocm} = 4,55$ м); $(T_{\delta yd})_i$ і $(T_{nocm})_i$ – відповідно річний хід температури всередині будівлі і назовні (температура постаменту антени ГНСС-станції).

На рис. 7 показано середній сезонний вертикальний рух ГНСС-станції за періоди спостережень 2004–2005 рр. та 2018–2019 рр., які обчислені представленим вище способом.

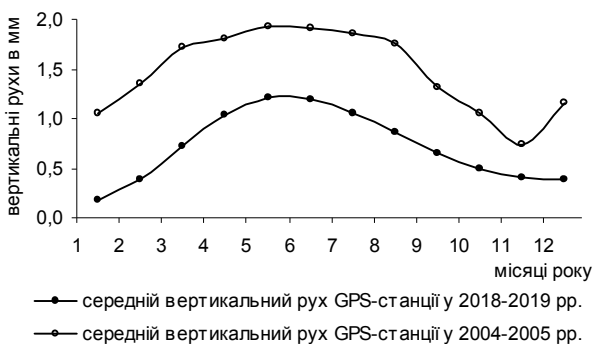


Рис. 7. Сезонні вертикальні рухи перманентної ГНСС-станції POLV

Коливання антени ГНСС-станції приблизно 1 мм, а її максимальне підняття припадає на кі-

нець травня. Слід відзначити незмінність числових характеристик сезонної складової вертикальних переміщень впродовж обох циклів спостережень.

Для отримання надійного зв'язку між системами висот 2004–2005 рр. і 2018–2019 рр. здійснено кілька паралельних визначень висот старих та нових марок. На рис. 8 показано повільні рухи ГНСС-станції у Полтаві за період 2004–2019 рр. відносно вихідного репера A1, а також лінійний тренд цих рухів.

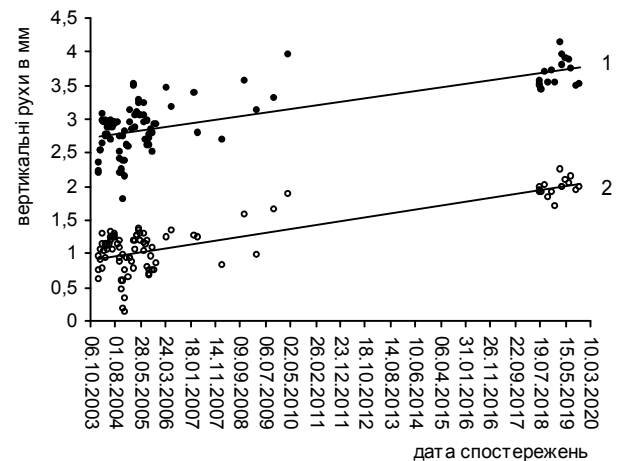


Рис. 8. Повільні рухи перманентної ГНСС-станції у Полтаві: 1 – за даними спостережень марки E, 2 – за даними спостережень марки W

Згідно з рис. 8, відбувається незначне повільне локальне підняття ГНСС-станції POLV, числові характеристики якого наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Числові характеристики повільних вертикальних рухів ГНСС-станції POLV внаслідок дії локальних гідротермічних чинників

За результатами спостережень	Повільні вертикальні рухи	
	за період 2004–2019 рр., мм	середньорічна швидкість підняття, мм за рік
східна марка E	1,03	0,065
західна марка W	1,11	0,070

Отримані результати свідчать про високу стійкість до повільних локальних рухів будівлі, на якій встановлено перманенту міжнародну ГНСС-станцію, а також про відсутність її

нахилів, оскільки швидкість підняття є практично однаковою за результатами спостережень обох нівелірних марок.

За супутниковими даними EUREF Permanent GNSS Network. Position Time Series, які безперервно надходили на сервер, зокрема і Європейської мережі EPN, можна спостерігати зміщення станції в трьох напрямках протягом довгого періоду (рис. 9). Оскільки супутникові дані є постійно мінливими, то для обробки використано метод апроксимації поліноміального

згладжування третього ступеню. В результаті апроксимації вертикальних рухів ГНСС-станції POLV побудовані лінії тренду (рис. 10).

Для періоду спостережень 2004–2005 рр. рівень достовірності апроксимації становить 0,058; функція, що описує цей вид згладжування, $z = 0,0002t^3 - 0,5721t^2 + 726,2t - 0,3 \cdot 10^6$.

Для періоду спостережень 2018–2019 рр. рівень достовірності апроксимації становить 0,3022; функція, що описує цей вид згладжування, $z = -0,0006t^3 + 3,733t^2 - 7486,2t + 5 \cdot 10^6$.

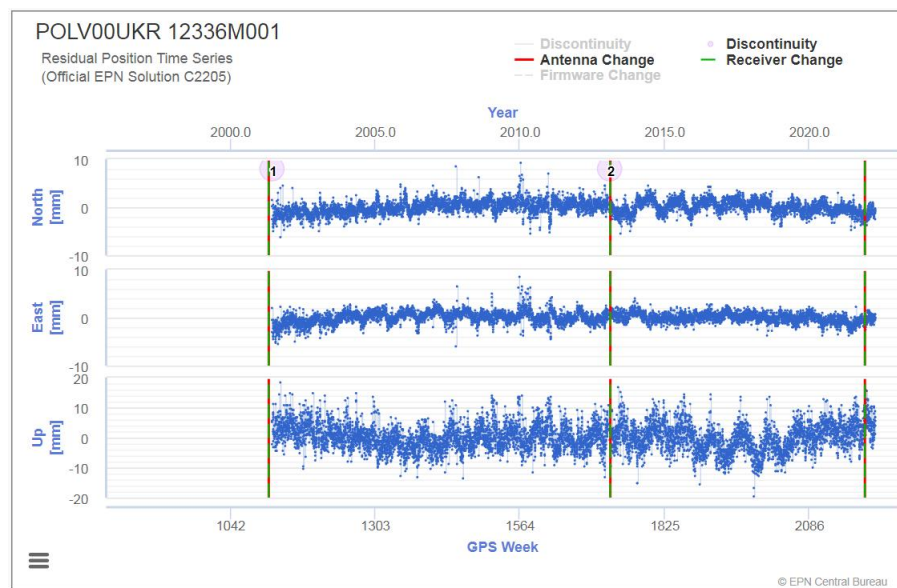


Рис. 9. Супутникові дані EUREF Permanent GNSS Network щодо рухів ГНСС-станції POLV

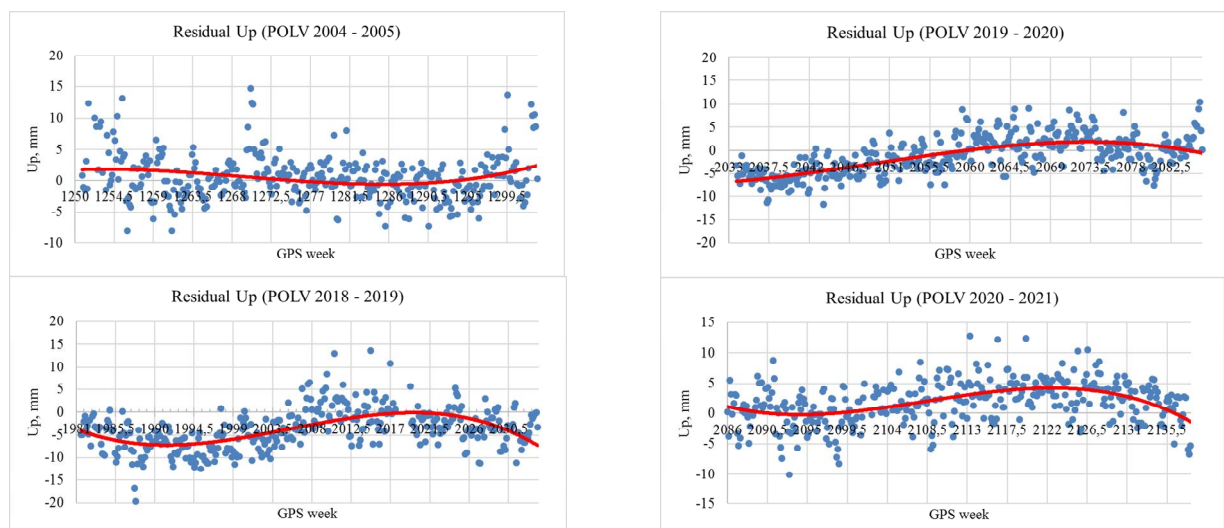


Рис. 10. Вертикальні рухи ГНСС-станції POLV у 2004–2005 рр. і з 2018–2021 рр. відповідно до супутникових спостережень [EUREF Permanent GNSS Network. Position Time Series]

Для періоду спостережень 2019–2020 рр. рівень достовірності апроксимації становить 0,4542; функція, що описує цей вид згладжування, $z = -0,0002t^3 + 1,0686t^2 - 2189,6t + 1 \cdot 10^6$.

Для періоду спостережень 2020–2021 рр. рівень достовірності апроксимації становить 0,2245; функція, що описує цей вид згладжування, $z = -0,0004t^3 + 2,4951t^2 - 5260,3t + 4 \cdot 10^6$.

Згідно з трендовими напрямками, на рис. 10 в період 2004–2005 рр. середнє коливання POLV становило до 2 мм, в період 2018–2019 рр. такі коливання збільшилися до 7 мм. Граничні значення вертикальних рухів ГНСС-станції POLV наведено у табл. 2.

Станція IGS/EPN є джерелом високоточних координат у загальноземних системах координат WGS-84/ITRF-XXXX та ін. 3 мм (СКП) для планових координат та 3–5 мм – для висоти (після певного періоду спостережень) [Жаліло та ін., 2017]. Спостереження станції для вико-

нання високоточних координатних визначень у диференціальному режимі надаються у міжнародних форматах: RINEX 2.10 (і вище) – стандарти файлів спостережень, призначених для післясеансної обробки (доступ користувачів здійснюється через FTP-сервер); NTRIP 1.0 (або вище) – транспортний протокол передачі диференціальних DGPS/RTK – корекцій у реальному часі через мережу Internet (доступ користувачів здійснюється через NTRIP-Caster лабораторії) – опціонально.

Супутникові дані ГНСС-станції POLV, які надходили на сервер Європейської мережі EPN, характеризуються високим розкидом до ± 20 мм. Проте, виконавши апроксимацію, амплітуда коливань зменшилася до 2 мм у період 2004–2005 рр. і до 7 мм у період 2018–2019 рр.

Офіційні швидкості станції, опубліковані EUREF, зведені в табл. 3.

Таблиця 2

Граничні значення вертикальних рухів ГНСС-станції POLV

Роки спостереження	2004–2005	2018–2019	2019–2020	2020–2021	2021–2022
Max, мм	+14,7	+13,6	+10,5	+12,8	+18,5
Min, мм	-8,0	-19,7	-11,7	-10,1	-19,7

Таблиця 3

Офіційні швидкості станції, опубліковані EUREF

Рамка	$V_{Пн}$, мм/рік	$V_{Сх}$, мм/рік	$V_{Ур}$, мм/рік
IGb14	12,33 \pm 0,01	22,44 \pm 0,00	-0,02 \pm 0,02
ETRF2014	0,32 \pm 0,01	-1,72 \pm 0,00	-0,06 \pm 0,02

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна проведених досліджень полягає у виявленій стабільності амплітуди вертикальних рухів ГНСС-станції “Полтава” (ідентифікатор POLV), що підтверджено наземним методом геометричного нівелювання і аналізом часових рядів супутникових спостережень. Виконані дослідження підтверджують вплив різних чинників на стійкість приймальних антен.

Висновки

Найбільш чутливою до дії зовнішніх чинників гідрометеорологічного походження є вертикальна складова динаміки земної поверхні. Як показали спостереження наземними геодезичними методами за період 2004–2019 рр.,

перманентна ГНСС-станція POLV відзначається високою стійкістю у висотному відношенні до локальних деформацій верхнього шару ґрунту. Її сезонні коливання сягають 2 мм, а повільний тренд не перевищує 0,07 мм/рік. В першому півріччі спостерігається підняття пункту, а в другому – його опускання. Достовірність визначення висотної компоненти підтверджено за результатами супутникових спостережень. Порівняння результатів наземними і супутниковими спостереженнями здійснено за періоди 2004–2005 рр. і 2018–2019 рр. На основі виконаних спостережень та моделювання складова вертикальних коливань приймальної антени, отримана у період 2004–2005 рр. і наземними, і супутниковими методами, не перевищувала 2 мм; у період 2018–2019 рр. аналіз супут-

никових даних показав збільшення коливань до 7 мм, це можна пояснити високим розкидом супутникових вимірювань. Виділено складові, що можуть впливати на вертикальні рухи ГНСС-станції, яка встановлена на інженерну споруду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- ГНСС група ГАО НАН України. URL: <https://gnss.mao.kiev.ua/?q=node/1>.
- Жалило А. А., Дохов А. И., Катюшина Е. В., Васильева Е. М., Яковченко А. И., Лукьянова О. А. Разработка высокоточной системы определения траекторий космических аппаратов и других высокодинамичных объектов. *Прикладная радиоэлектроника*. 2017. Т. 16, № 3–4. С. 112–116. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/are_3_2.pdf.
- Ломпас О. В., Яхторович Р. І., Савчин Ігор. Дослідження добового руху ГНСС-станції BRGN. *Геодинаміка*. 2016. № 1 (20), 21–31. URL: <https://doi.org/10.23939/jgd2016.01.021>.
- Нестеренко С. В. Забезпечення стійкості встановлення ГНСС-станцій. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. № 78. С. 379–392. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.379-392>.
- Павлик В., Кутний А., Бабич Т. Результати дослідження вертикальних та горизонтальних гідротермічних рухів земної поверхні добового періоду на полігоні у Полтаві. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2013. Вип. 2. С. 80–84. URL: <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3278>.
- Павлик В. Г., Кутний А. М., Нестеренко С. В. Визначення локальних вертикальних рухів постійної GPS-станції у Полтаві. *Академічна й університетська наука: результати та перспективи: матер. XIII Міжнар. наук.-практ. конф.* НУШП, Полтава, 10–11.12.2020. С. 141–145. URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/9080>.
- Савчук С. Г., Заблоцький Ф. Д., Янків-Вітковська Л. М., Джуман Б. Б. Про кореляцію між значеннями параметра іоносфери VTEC на GNSS-станціях України. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2019. Вип. 20, 13–17. URL: <https://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/143>.
- Третяк Корнилий, Смірнова О. М., Бределева Т. М. Дослідження періодичних змін висотного положення супутникових постійних станцій світу. *Геодинаміка*, 2012. Vol. 1(12), 11–29. URL: <https://doi.org/10.23939/jgd2012.01.011>.
- Янків-Вітковська Л. М. Дослідження динаміки змін координат GPS-станцій для прогнозування їх точності. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. Вип. 74, 77–82. URL: <https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-74-2011/study-dynamic-changes-coordinates-gps-stations>.
- EUREF Permanent GNSS Network. URL: <http://www.epncb.oma.be>.
- EUREF Permanent GNSS Network. Position Time Series. URL: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/timeseries/index.php?station=POLV00UKR.
- Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K., Miyazaki, S. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal Geophysical Research*. 2002. Vol. 107(B4). URL: <https://doi.org/10.1029/2001JB000573>.
- Gulal E., Erdogan H., Tiryakioglu I. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. *Digital Signal Processing*. 2013. Vol. 23, Is. 6, 1945–1957. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.06.014>.
- Isawi S., Schuh H., Mannel B., Sakic P. Stability analysis of the Iraqi GNSS stations. *Journal of Applied Geodesy*. 2022. Vol. 16, No. 3, 299–312. URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2022-0001>.
- Lyon, T. J., Filmer, M. S., Feathersstone, W. E. On the use of repeat leveling for the determination of vertical land motion: artifacts, aliasing and extrapolation errors. *Journal Geophysical Research*. 2018. Vol. 123, 7021–7036. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JB015705>.

Svitlana NESTERENKO^{1*}, Volodymyr PAVLYK², Roman MISHCHENKO¹

¹ Department of Highways, Geodesy, Land Management and Rural Buildings, National university “Yuri Kondratyuk Poltava polytechnic”, 24, Pershotravneva Avenue, Poltava, 36011, Ukraine, e-mail: NesterenkoS2208@gmail.com, rom2014rom2014@gmail.com, ^{1*} <http://orcid.org/0000-0002-2288-3524>, ¹ <http://orcid.org/0000-0003-1027-0541>

² Poltava Gravimetric Observatory of S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Myasoedova Str., Poltava, 36014, Ukraine, e-mail: vgpavlyk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6389-0758>

ANALYSIS OF VERTICAL MOVEMENTS OF THE PERMANENT GNSS STATION POLV ON THE BASE OF SATELLITE DATA AND LEVELING

The purpose of this work is to analyze the results of the study of the dynamics of vertical movements of the permanent station of the GNSS positioning system “Poltava” (identifier POLV). Method. A geodynamic test site was set up on the territory of the Poltava Gravimetric Observatory. It includes rappers with known stability indicators laid at

different depths. The exact level of H-05 is set on the A1 standard, which is characterized by high stability over 30 years of observations. The GNSS station, the vertical movements of which were studied, is installed on a specially built pedestal on the inner capital wall of the laboratory building of the Poltava Gravimetric Observatory of the S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. The movement dynamics of the base station was monitored by marks placed on the edges of the western and eastern sides of the laboratory building. To evaluate and compare the obtained results, satellite data were processed by the method of approximation of polynomial smoothing of the third degree. According to the results of periodic geometric leveling, it was established that for the period 2004–2019, the slow vertical movements of the stamps were 1.03–1.11 mm with an average annual rate of rise of 0.065–0.07 mm/year. Seasonal vertical movements of the permanent GNSS station POLV are within 2 mm/year, and in the first half of the year, there is a rise of the point and a decline was in the second half of the year. Selected components that can affect the vertical movements of a GNSS station installed on an engineering structure. A comparison of ground and satellite observations results was made for the periods of 2004–2005 and 2018–2019. Based on the observations and modeling, the component of vertical oscillations of the receiving antenna obtained in the period of 2004–2005 by both ground and satellite methods did not exceed 2 mm; in the period of 2018–2019, the analysis of satellite data showed an increase in fluctuations up to 7 mm. This can be explained by a large spread of satellite measurements. Scientific novelty and practical significance lie in the detected stability of the amplitude of vertical movements of the GNSS station, which was confirmed by the ground method of geometric leveling and the analysis of the time series of satellite observations. The conducted studies confirm the influence of various factors on the stability of receiving antennas.

Key words: global navigation satellite systems (GNSS), permanently operating (permanent) stations, receiving antennas, vertical displacements, geometric leveling, satellite observation data.

Надійшла 01.12.2022 р.