

## ДИНАМІКА ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИДНІПРОВСЬКОЇ НИЗОВИНИ

Світлана Нестеренко<sup>1\*</sup>, Роман Міщенко<sup>2\*</sup>

1\*. Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий 24, Полтава, Україна, 36000, E-mail: NesterenkoS2208@gmail.com

2\*. Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий 24, Полтава, Україна, 36000, E-mail: rom2014rom2014@gmail.com

Здійснено аналіз динаміки вертикальних рухів перманентних супутникових станцій земної поверхні Придніпровської низовини на основі даних ГНСС-вимірів і дистанційного зондування Землі. Визначено зміщення геодезичних пунктів протягом 2021 року і виконано оцінку результатів. Зафіксовані максимальні вертикальні швидкості руху контрольних пунктів за 2021 рік за даними InSAR, що становлять 3,6 мм/міс (DNMU «Дніпро»). Середні значення різниць швидкостей, визначені за результатами радіоінтерферометричних вимірів та ГНСС, складають 1,6 мм/міс.

*Ключові слова:* вертикальні зміщення, ГНСС-станції, InSAR, Придніпровська низовина.

### Вступ

Поверхня Землі постійно знаходиться у безперервному русі. Швидкість тектонічних рухів, механічних рухів земної кори під впливом внутрішніх сил Землі, відносно невелика, змінюється від сотих до десятків мм/рік. Рух накопичується і призводить до деформацій земної кори, в тому числі і поверхневих шарів. Вивчення вертикальних і горизонтальних тектонічних рухів дозволяє вивчати динаміку зміни геофізичного поля даного регіону.

Актуальним є дослідження динаміки рухів Придніпровської низовини.

### Постановка проблеми

У наш час інформація про сучасну кінематику земної кори регіону суттєво доповнюється ГНСС-вимірами. Наявність у будь-якому регіоні мережі ГНСС-станцій дозволяє забезпечити централізовану інформаційну підтримку геодезичних робіт користувачів на всій території регіону. При цьому в зоні розташування постійно-діючих перманентних станцій є можливість отримання високоточних даних координат.

Відслідковувати рух частин земної поверхні можна за поведінкою руху перманентних станцій, які знаходяться в зоні дослідження. Розташування ГНСС-станцій постійно піддаються впливу різних факторів, які спричиняють короткострокові або довгострокові рухи. Значна кількість наукових досліджень присвячена цій тематиці.

У підході до дослідження горизонтальних рухів земної кори Європи науковцями Третьяк К.Р., Вовк А.І. було використано результати опрацювання часових серій для ГНСС-станцій території Європи в системі координат ITRF 2005, загальною кількістю близько 170 станцій [Tretiyak et al., 2012, Третьяк та ін., 2011, Третьяк та Вовк, 2012, Вовк, 2015]. Змінність добових координат ГНСС-станцій під дією сонячної радіації і температури повітря розглянуто у статтях [Gerhatova et al., 2016, Villiger et al., 2013].

Деформації поділяються на локальні і глобальні. Перші являють собою деформації, спричинені ефектами, що впливають лише на окремі ділянки (зсуви, нестійкість основи). Глобальні деформації обумовлені тектонікою і мають вплив на всю ділянку в межах певної території. Локальні та глобальні ефекти мають подібний порядок величини, однак їхні просторові автокореляції відрізняються. Основною темою статті Brockmann E., Ineichen D., Marti U., Schaer, S., Schlatter A., Villiger A. є порівняння результатів двох незалежних методів вимірювання GNSS і нівелювання для визначення вертикальних переміщень для Швейцарії, які показали значне альпійське підняття максимум на 1,5 мм/рік [Villiger A. et al., 2013]. Аналіз часових рядів руху і оцінка річних швидкостей ГНСС-станцій наведені у статті Gerhatova L., Habel B. [Gerhatova et al., 2016].

Метою роботи є аналіз динаміки вертикальних рухів земної кори Придніпровської низовини, визначених за даними ГНСС-вимірів і за результатами дистанційного зондування Землі.

### Виклад основного матеріалу

Придніпровська низовина розміщена на півдні Східно-Європейської рівнини, на лівобережжі Дніпра, у межах Білорусі та України (Чернігівської, Сумської, Полтавської та частково Київської, Черкаської, Дніпропетровської і Харківської областей). У межах Придніпровської низовини виділяють дві частини: Придніпровську рівнину та Полтавську рівнину. Висота над рівнем моря становить 50 – 160 м, найбільша 236 м, ширина до 120 км.

Для оцінки вертикальних рухів Придніпровської низовини були вибрані чотири пункти перманентної мережі, що розташовані на ній: GLSV «Київ/Голосіїв», POLV «Полтава», DNMU «Дніпро», ZPRS «Запоріжжя». Геодезичні пункти належать різним операторам: ГАО НАН України, ПрАТ «Систем Солюшнс» (мережа

System.NET), Науково-дослідному інституту геодезії і картографії (УПІМ ГНСС), Національному центру управління та випробувань космічних засобів (Система Координатно-часового і Навігаційного Забезпечення України).

Загальна інформація ГНСС-станцій, які розміщені на Придніпровській низовині, наведено у таблиці 1.

Табл. 1. Відомості про ГНСС-станції Придніпровської низовини

ГНСС-станції	Координати Н, м	Включено до мережі		Оператор
		IGS	EPN	
GLSV	226,316	з 06.05.1998	з 10.05.1998	ГАО НАНУ
POLV	178,367	з 27.06.2001	з 09.09.2001	УПІМ ГНСС
DNMU	102,428	–	з 20.02.2017	System.NET
ZPRS	93,613	–	з 29.04.2018	СКНЗУ

Всі вищеперелічені пункти входять до Європейської мережі EPN (EUREF Permanent GNSS Network). Станції EPN (IGS) є джерелом високоточних координат в загальноземних системах координат WGS-84/ITRF-XXXX, СКП = 3–5 мм для висоти після певного періоду спостережень [Nesterenko S.V. et al., 2023]. За супутниковими даними, які безперебійно надходили на сервер ГАО НАНУ і EPN, було отримано зміщення станцій у вертикальному напрямі протягом 2021 року [EUREF Permanent GNSS Network].

Переміщення точок низовини також можна проконтролювати дистанційним методом, зокрема за допомогою радіолокаційних спостережень технологією InSAR. Сучасні радіолокаційні технології дозволяють визначати положення різних об'єктів і елементів в трьох вимірах в будь-який час за допомогою фазової частини радіолокаційного сигналу. Радар використовує метод синтетичної апертури для отримання вимірювання високої роздільної здатності у двох вимірах та інтерферометрії для отримання третього вимірювання. Інтерферометричний радар із синтетичною апертурою InSAR – це інструмент, який використовує радіолокаційні сигнали для вимірювання деформацій земної кори шляхом інтерференції двох радарних сканувань, зроблених тієї самої області в різний час [Galloway, 2000].

Дослідження деформацій Придніпровської низовини в зоні розміщення перманентних станцій здійснювалося за допомогою супутникової радіолокації InSAR у вільнодоступному програмному забезпеченні SNAP на платформі Linux з використанням радарних знімків, виконаних супутником Sentinel-1 та завантажених на вебплатформі Copernicus Open Access Hub [https://scihub.copernicus.eu/].

Опрацюванню підлягали космічні знімки, що покривали задану територію, отримані

супутником Sentinel-1 через кожні 12 днів протягом 2021 року.

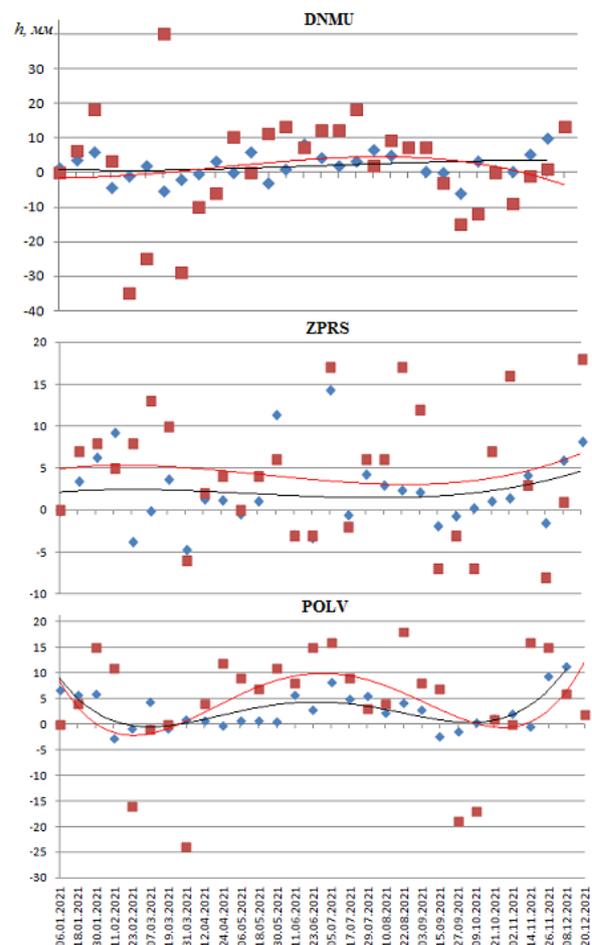


Рис. 1. Вертикальні рухи GPS-станцій DNMU, ZPRS, POLV за 2021 рік: синім кольором – згідно супутникових спостережень, червоним – за результатами InSAR

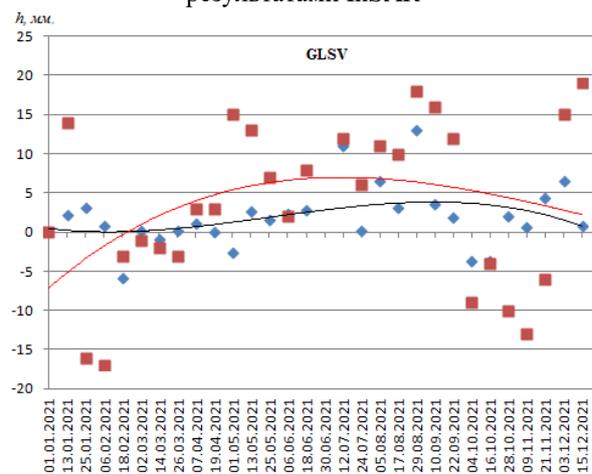


Рис. 1. Вертикальні рухи GPS-станції GLSV за 2021 рік: синім кольором – згідно супутникових спостережень, червоним – за результатами InSAR

Вертикальні швидкості руху контрольних пунктів за 2021 рік за даними ГНСС становлять:  $V_{GNSS} (DNMU) = 1,3$  мм/міс;  $V_{GNSS} (ZPRS) = 1,6$  мм/міс;

$V_{GNSS (POLV)} = 1,2$  мм/міс;  $V_{GNSS (GLSV)} = 1,6$  мм/міс. Визначені вертикальні швидкості руху контрольних пунктів за 2021 рік за даними InSAR складають:  $V_{InSAR (DNMU)} = 3,6$  мм/міс;  $V_{InSAR (ZPRS)} = 2,2$  мм/міс;  $V_{InSAR (POLV)} = 3,5$  мм/міс;  $V_{InSAR (GLSV)} = 3,0$  мм/міс. Приведені вертикальні швидкості за інтерферометричними даними відповідають найближчому пікселю розташованому відносно контрольного пункту. Різниця швидкостей визначені за результатами радіоінтерферометричних вимірів та ГНСС:  $\Delta = V_{InSAR} - V_{GNSS}$ . Середнє значення різниць  $\Delta$  складає  $\Delta_{avg} = 1,65$  мм/міс. З отриманих результатів видно, що у розподілі різниць  $\Delta$  присутні систематичні складові. Ці систематичні різниці швидкостей є проявом впливу факторів на інтерферометричні виміри, таких як затримка сигналу через тропосферні затримки, орбітальні або топографічні помилки, трансформаційний зсув вертикальних швидкостей точок (пікселів) з системи координат LOS до WGS-84, просторова та часова декореляція. З радіоінтерферометричних вимірів визначені редуковані вертикальні швидкості з вилученою систематичною складовою  $V_r = V_{InSAR} - \Delta_{avg}$ :  $V_r (DNMU) = 1,95$  мм/міс;  $V_r (ZPRS) = 0,55$  мм/міс;  $V_r (POLV) = 1,85$  мм/міс;  $V_r (GLSV) = 1,35$  мм/міс.

### Висновки і пропозиції

Отримані дані ГНСС і InSAR методами демонструють подібні часові та просторові моделі зміщення. Кожного року у першому півріччі відбувається підняття усіх ГНСС-станцій, а у другому півріччі усі пункти опускаються.

Динаміка вертикальних рухів земної кори Придніпровської низовини, визначених за даними ГНСС-вимірів чотирьох перманентних станцій, становить в середньому 1,4 мм/міс; за результатами дистанційного зондування Землі – 3,1 мм/міс. Зафіксовані максимальні вертикальні швидкості зміщення геодезичних пунктів протягом 2021 року за даними InSAR, що становлять 3,6 мм/міс (DNMU «Дніпро»). Середні значення різниць швидкостей, визначені за результатами радіоінтерферометричних вимірів та ГНСС, складають 1,6 мм/міс.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- EUREF Permanent GNSS Network. Position Time Series. URL: [http://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/timeseries/index.php?station=POLV00UKR](http://www.epncb.oma.be/_productsservices/timeseries/index.php?station=POLV00UKR).
- Galloway, D.L. (2000). Measuring land subsidence from space. In: U.S. Geol. Surv. Fact Sheet. 51 (0), p. 4.
- Gerhatova, L. & Hefty, J. & Spanik, Peter. (2016). Short-Term and Long-Term Variability of Antenna Position Due to Thermal Bending of Pillar Monument at Permanent GNSS Station.

- Reports on Geodesy and Geoinformatics*. 100. 66-77. 10.1515/rgg-2016-0007.
- Nesterenko S.V., Pavlyk V.G., Mishchenko R.A. (2023). Analysis of vertical movements of the permanent GNSS-station POLV on the base of satellite data and leveling. *Geodesy, cartography and aerial photography*. Vol. 97. 46–55. doi: 10.23939/istcgcap2023.97.046
- Tretyak K.R., Smirnova O.M., Bredeleva T.M. (2012). Study of periodic changes of the world satellite permanent stations altitudes. *Heodynamika*. Vol. 1(12), 11-29. doi: 10.23939/jgd2012.01.011
- Villiger, Arturo & Geiger, Alain & Marti, Urs & Brockmann, E. (2013). Extraction of a kinematic model for Switzerland based on GNSS and levelling data. 10575.
- Вовк А.І. (2015). Аналіз горизонтальних рухів земної кори Центральної Європи, визначених за ГНСС-вимірами. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Випуск II (30). С. 28–31.
- Третяк К. Р., Вовк А. І. (2012). Дослідження динаміки горизонтальних рухів земної кори Європи за даними GNSS спостережень (2000–2010). *Геодинаміка*. Вип. 2(13). С. 5–17.
- Третяк К., Кульчицький А., Дульцев А. та ін. (2011). Сучасні рухи земної кори в Карпато-Балканському регіоні за результатами опрацювання GPS-вимірів і геолого-геофізичних даних. *Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS і GIS-технології: зб. матер. XVI Міжнародного наук.-техн. симпозіуму*. С. 123–132.

## DYNAMICS OF VERTICAL MOVEMENTS OF THE EARTH SURFACE OF THE DNIEPER LOWLAND

**Svetlana Nesterenko, Roman Mishchenko**

An analysis of the dynamics of vertical movements of permanent satellite stations on the earth's surface of the Dnieper lowland was carried out based on the data of GNSS measurements and remote sensing of the Earth. The displacement of geodetic points during 2021 was determined and the results were evaluated. Recorded maximum vertical movement speeds of checkpoints for 2021 according to InSAR data, amounting to 3.6 mm/mo (DNMU «Dnipro»). The average values of speed differences, determined by the results of radio interferometric measurements and GNSS, are 1.6 mm/mo.

*Key words:* vertical displacements, GNSS stations, InSAR, Dnieper lowland.

