

УДК 528.44:550.34

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЩОЇ ГЕОДЕЗІЇ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В МОНІТОРИНГУ
ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ**

Канд. екон. наук Д. Д. Хайнус, д-р тех. наук С. Г. Могильний,
кандидати екон. наук С. О. Винограденко, Н. О. Капінос

**MODERN METHODS OF HIGHER GEODESY AND THEIR APPLICATIONS
IN MONITORING EARTH'S SURFACE DEFORMATION**

PhD (Econ.) D. Khainus, Dr. Sc. (Tech.) S. Mohylnyi,
PhD (Econ.) S. Vynohradenko, PhD (Econ.) N. Kapinos

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341836>



***Анотація.** Метою дослідження є систематизація сучасних методів вищої геодезії та оцінювання їхньої ефективності для моніторингу деформацій земної поверхні. Розглянуто принципи роботи і технічні особливості GNSS, мереж CORS, інтерферометрії синтетичної апертури (InSAR) і гібридних підходів, що поєднують супутникові та наземні вимірювання. Наведено приклади застосування для контролю інженерних споруд, природних ландшафтів*

та інфраструктури, включно з використанням безпілотних літальних апаратів у фотограмметричних зйомках. Оцінено точність, вартість і часову ефективність різних технологій. Запропоновано рекомендації щодо вибору оптимальних методів залежно від умов об'єкта, а також перспективи розвитку, включно з впровадженням GNSS PPP-RTK, штучного інтелекту та інтеграції з ГІС.

Ключові слова: вища геодезія, GNSS, InSAR, моніторинг деформацій, CORS-мережі, гібридні методи, дистанційне зондування.

Abstract. The purpose of this research is to systematize contemporary high-precision geodesy methods and assess their efficiency for monitoring Earth surface deformations. The study reviews operational principles and technical characteristics of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Continuously Operating Reference Station (CORS) networks, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques, and hybrid approaches that combine satellite-based and terrestrial measurements. Examples of practical applications are provided for monitoring engineering structures, natural landscapes, and infrastructure facilities, including the integration of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for photogrammetric surveys. The analysis covers accuracy parameters, temporal resolution, spatial coverage, cost efficiency, and operational constraints of each method. Specific attention is given to error sources such as atmospheric delays, multipath effects, and limitations in dense urban or forested environments. The research proposes a comparative framework for selecting optimal monitoring techniques based on object-specific conditions, required precision, and resource availability. It also identifies trends shaping the future of geodetic monitoring, including the implementation of GNSS Precise Point Positioning in Real Time Kinematic mode (PPP-RTK), artificial intelligence integration for automated deformation detection and classification, multi-sensor data fusion (GNSS, InSAR, LiDAR, photogrammetry), and expanded access to free satellite radar imagery. The study emphasizes the importance of engineering and technical support, covering advanced GNSS receivers, high-precision total stations, digital levels, and specialized processing software for both GNSS and InSAR data. GIS integration is highlighted as a critical step for visualizing and analyzing deformation patterns within unified spatial analytical environments. The findings confirm that combining multiple geodetic techniques significantly increases the reliability and spatial completeness of deformation monitoring, supporting timely decision-making in safety-critical and geodynamically unstable areas.

Keywords: high-precision geodesy, GNSS, InSAR, deformation monitoring, CORS networks, hybrid methods.

Вступ. Стаття належить до галузі вищої та інженерної геодезії, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і геоінформаційних технологій, а за сферою застосування — до виробничих практик будівництва та експлуатації інженерних споруд, управління міською інфраструктурою, моніторингу гірничих територій і природно-техногенних ризиків. У цьому контексті геодезичний моніторинг деформацій розглядають як систему інструментальних і аналітичних процедур, спрямованих на виявлення, кількісне оцінювання та інтерпретацію просторово-часових змін положення

об'єктів із метрологічно підтвердженою точністю і відтворюваністю результатів.

Актуальність дослідження обумовлена кількома чинниками. Передусім зростає кількість інженерних об'єктів — мостів, дамб, тунелів, хмарочосів, для яких потрібний постійний або періодичний контроль переміщень [13]. Далі, в умовах глобальних змін клімату зростає частота і масштаб геодинамічних явищ — зсувів, карстових провалів, осідань ґрунту, підтоплень, що безпосередньо впливають на стійкість інженерних систем і безпеку населення [20]. Крім того, розвиток

ГНСС-обладнання (Global Navigation Satellite Systems) і програмного забезпечення зробив високоточні вимірювання доступнішими для широкого кола користувачів і суттєво знизив бар'єри для впровадження моніторингових рішень на різних рівнях — від локальних до регіональних [3].

Особливістю сучасної вищої геодезії є інтеграція різних методів вимірювань — GNSS, інтерферометрії синтетичної апертури (InSAR), оптичної фотограмметрії та класичних геодезичних технологій [1, 18]. Такий мультисенсорний підхід забезпечує комплементарність даних, підвищує надійність оцінок і дає змогу формувати повнішу картину деформаційних процесів у часі й просторі, включаючи як швидкоплинні події, так і повільні тренди осідання.

Ураховуючи наведене, мета цієї статті полягає в систематизації сучасних технологій геодезичного моніторингу деформацій, обґрунтуванні принципів їх інтеграції та формуванні практичних рекомендацій щодо вибору методів для типових сценаріїв інженерного моніторингу з урахуванням національних методичних і нормативних особливостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні п'ять років суттєво просунуто методологію моніторингу деформацій на основі InSAR і високоточного позиціонування GNSS, зокрема в напрямках підвищення точності часових рядів, абсолютної прив'язки та інтеграції з ГІС. Системно узагальнено досягнення PPP-RTK, окресливши виклики (атмосферні моделі, затінення в міському середовищі) і напрями розвитку (мульті-GNSS/мультичастотність, низьковартісні приймачі), що прямо корелює з потребами інженерного моніторингу [15]. Паралельно з'являються прикладні дослідження InSAR у складних урбаністичних умовах (інтенсивна забудова, підземні комунікації), де валідовано підвищену метрологічну надійність на контрольних точках GNSS [7, 12].

InSAR підтвердив ефективність для картографування осідань великих агломерацій і транспортної інфраструктури з міліметровою річною чутливістю: для 35 китайських мегаполісів уздовж метро показано RMSE $\sim 3,75$ мм/р. відносно безперервних GNSS-станцій, що засвідчує високу відтворюваність оцінок швидкостей [12]. Масштабні регіональні оцінки (Техаське узбережжя Мексиканської затоки) демонструють роботу PS-InSAR на масивах $>1,7$ млн стійких відбивачів із калібруванням за 115 CORS-станціями як приклад поєднання площинної щільності InSAR з еталонною абсолютністю GNSS [7]. Разом ці праці визначають інструментарій для контролю повільних трендів осідання в містах і на об'єктах лінійної інфраструктури [7, 12].

Трендом є інтеграція InSAR і GNSS (а також GB-SAR) для складних інженерних задач. На гідротехнічних спорудах запропоновано схеми виявлення фазових «зривів» у довгих GB-SAR серіях на основі контрольних GNSS-рядів, що підвищує узгодженість деформаційних карт із числовими моделями [5]. Інший кейс — захисна система MOSE (Венеція), де безперервні GNSS-спостереження інтегровано з InSAR для контролю деформацій елементів інфраструктури у 2021–2023 рр., що демонструє практичну придатність мультисенсорного підходу у прибережно-урбаністичному середовищі [2]. Ці дослідження підтверджують: GNSS надає абсолютність і часову стійкість, InSAR — високу просторову роздільність, а разом вони підвищують надійність моніторингу [2, 5].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є систематизація сучасних методів вищої геодезії та обґрунтування принципів їх застосування та інтеграції (GNSS/CORS, InSAR, тахеометрія, прецизійне нівелювання) для моніторингу деформацій земної поверхні в складних природно-техногенних умовах із забезпеченням

єдиної системи координат, високої метрологічної достовірності та можливості подальшої автоматизації і включення результатів у системи раннього попередження. Для досягнення поставленої мети в роботі послідовно вирішено такі завдання: охарактеризовано теоретичні засади вищої геодезії, які забезпечують побудову референцних систем і часових рядів деформацій; розглянуто сучасні методи і технології вимірювань (GNSS/CORS, InSAR, тахеометрія/нівелювання) з оцінюванням їхньої точності, роздільної здатності, латентності та відтворюваності за різних умов спостереження; запропоновано підхід для узгодження та об'єднання даних із різних джерел у єдиній системі координат без втрати точності з прозорою процедурою валідації; наведено репрезентативні приклади практичного застосування для моніторингу деформацій (міські осідання, лінійна та гідротехнічна інфраструктура, гірничі території), порівнюючи із наземними вимірюваннями; виконано порівняльний аналіз техніко-економічної ефективності методів і сформовано рекомендації щодо вибору технологій залежно від мети, умов об'єкта і бюджетних обмежень; окреслено вимоги щодо автоматизації моніторингу та інтеграції результатів у системи раннього попередження про небезпечні деформації.

Основна частина дослідження. Вища геодезія — це розділ геодезичної науки, зорієнтований на відтворюване визначення просторового положення точок земної поверхні з максимально можливою точністю, яка в сучасних практиках сягає міліметрового й субміліметрового діапазонів. Її предметне поле охоплює формування та підтримання референцних систем координат, побудову високоточного часо-просторового каркаса для спостережень, а також кількісне моделювання рухів земної кори та деформацій інженерних споруд, що забезпечує наукові дослідження і критичні

виробничі застосування високоточного позиціонування.

Методологічним ядром є глобальні та національні системи відліку. WGS 84 використовують як базову операційну систему в навігаційних сервісах GPS; міжнародна реалізація ITRF забезпечує узгодженість у глобальній геоцентричній рамі з явним урахуванням тектонічних рухів і обов'язковим зазначенням епохи; українська УСК-2000 є сумісною з ETRS89 і застосовувана для топогеодезичних робіт у національному контексті. Коректність інтеграції багатоджерельних даних (GNSS, InSAR, наземні вимірювання) критично залежить від суворого дотримання цих рамок і прозорих процедур перетворення між ними (зокрема семипараметрових перетворень типу Гельмерта з фіксацією епохи).

Точність геодезичних визначень визначена сукупною дією кількох класів похибок. До супутникових належать неточності ефемерид і нестабільність бортових годинників, що зменшуються завдяки використанню точних орбітально-часових продуктів. Атмосферні впливи проявляються передусім у вигляді іоносферної та тропосферної затримок (рис. 1); їх мінімізують за рахунок багаточастотних спостережень, відповідних емпіричних і фізичних моделей і комбінованої фільтрації часових рядів. Багатопроменевість (multipath), спричинена відбиттям сигналів від навколишніх поверхонь у міському середовищі, контролюють підбиранням майданчиків, використовуючи антени з відсікачами та спектральні методи приглушення. Власний шум приймача та інші інструментальні ефекти знижують калібруванням апаратури, оптимізацією режимів спостереження, контролем якості (PDOP, AR-ratio тощо). Сукупне дотримання цих принципів робить можливим застосування сучасних методів вищої геодезії для високоточного моніторингу деформацій земної поверхні в найскладніших природних і техногенних умовах.

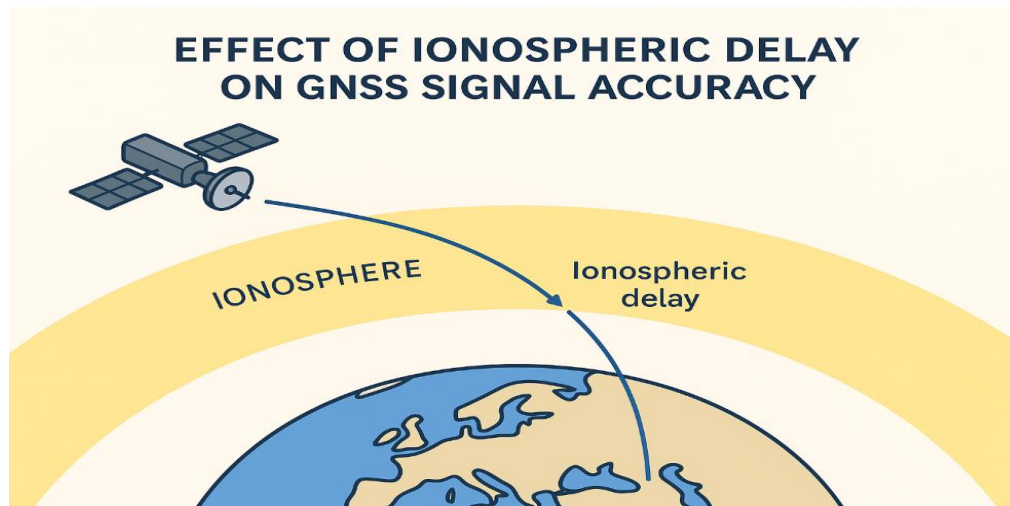


Рис. 1. Приклад впливу іоносферної затримки на точність GNSS-сигналу

Іоносфера є дисперсним середовищем, у якому радіосигнал GNSS зазнає частотно-залежної зміни ходу; величина затримки пропорційна повному вмісту електронів (TEC) і обернено пропорційна квадрату несучої частоти ($\sim \text{TEC}/f^2$) [9]. Для кодових вимірювань прояв домінує як додатна групова затримка, тоді як для фазових — як еквівалентне «випередження» фази; вплив зростає за малих кутів піднесення і під час іоносферних збурень/сцинтиляцій [1, 14]. Компенсація здійснюється іонозалежними комбінаціями дво-/трифреквентних вимірювань (ionosphere-free), із використанням глобальних і регіональних іоносферних продуктів (наприклад IGS GIM у реальному часі) і контролем якості через «геометрично-вільні» комбінації [8]. Для одночастотних приймачів можливе застосування емпіричних моделей типу Клобучара з параметрами, що трансльовані навігаційним повідомленням GPS. У поєднанні з чітко визначеною епохою в ITRF ці процедури забезпечують метрологічно коректне зіставлення часових рядів та інтеграцію даних GNSS і InSAR у глобальній референц-рамці [14].

Системи просторового відліку, що застосовувані у високоточних геодезичних роботах, взаємопов'язані через

семипараметрове перетворення Гельмерта (три трансляції, три обертання та масштаб) і його часовозалежні модифікації для задач підвищеної точності; коректність такої взаємодії потребує явного зазначення реалізації та епохи (табл. 1). Для пар ITRF $\leftrightarrow$ ITRF і WGS 84 $\leftrightarrow$ ITRF публікують офіційні параметри узгодження; історично ITRF2000 використовували як базову систему для формулювання національних трансформацій. У вітчизняному контексті затверджені транспозиційні параметри між УСК-2000 та ITRF2000 мають значення $\Delta X = 24,322$ м, $\Delta Y = -121,372$ м, $\Delta Z = -75,847$ м, тоді як обертання і масштаб приймають близькими до нуля за умови строгої фіксації епохи.

Взаємна відповідність WGS 84 і ITRF перебуває на сантиметровому рівні: сучасні реалізації WGS 84 (G1762, G2296) вирівняні до відповідних глобальних референц-рамок, тож різниці, релевантні для інженерних застосувань, зазвичай не перевищують кількох сантиметрів. УСК-2000 є геоцентричною національною системою України, інтегрованою з ITRF переважно через трансляційні члени; вона придатна для робіт у локальних проєкційних зонах (МСК) і забезпечує сантиметровий рівень точності за умови застосування регламентованих параметрів перетворення.

Таблиця 1

Порівняння параметрів основних референцних систем

Параметр	WGS 84	ITRF	УСК-2000
Тип системи	Глобальна геодезична система (геоцентрична)	Міжнародна геоцентрична система (реалізація ITRS)	Національна система України (геоцентрична, локальні зони проєкцій)
Походження та реалізація	Розроблена для глобального позиціонування	Постійно оновлювана (ITRF2000, ITRF2020 тощо); точність до сантиметрів	Синхронізована з ITRF (2020, 2000 тощо); забезпечена локальними зонами УСК-2000 / МСК-зонами
Точність відповідності	Дуже висока, відрізняється від ITRF лише на рівні сантиметрів	Висока: RMS-розбіжності між реалізаціями ~1 см	Різниця координат від ITRF/WGS84 до 10 м, у середньому 2–3 м

Джерелом координатно-часової інформації у вищій геодезії є глобальні навігаційні супутникові системи GNSS — GPS (США), GLONASS (РФ), Galileo (ЄС), BeiDou (КНР) і регіональні QZSS та IRNSS [10]. Високоточні визначення базовані на фазових спостереженнях, кількох несучих і сучасних методах оброблення (мережевий RTK, PPP/PPP-RTK), що за сприятливих умов забезпечує точність порядку 1–2 мм у плані та 3–5 мм за висотою на контрольних пунктах [9]. Сукупність наведених положень разом із міжсистемними співвідношеннями, зведеними в табл. 1, створює метрологічне підґрунтя для надійної інтеграції GNSS із InSAR і наземними геодезичними вимірюваннями в задачах моніторингу деформацій.

Оброблення GNSS-даних у вищій геодезії ґрунтовано на низці режимів, що вибирають з огляду на вимоги щодо точності, тривалість спостережень і оперативність отримання результатів. У статичному режимі координати визначають за тривалими сесіями спостережень (від кількох годин до доби) із постобробленням фазових вимірювань; цей підхід є еталонним

для закладання та згущення опорних геодезичних мереж завдяки високій стійкості фіксації неоднозначностей і можливості суворого контролю якості розв'язку. Швидкий статичний режим зменшує тривалість стояння на пункті до 15–60 хв, що робить його доцільним у польових знімальних роботах, для створення локальних опорних каркасів, коректно підібраної геометрії сузір'їв і антенних моделей; забезпечена сантиметрово-міліметрова точність у плані та кілька міліметрів — у висоті.

Для задач, де критичною є оперативність, застосовують кінематичні методи. RTK (Real-Time Kinematic) забезпечує визначення координат у реальному часі за рахунок передавання диференційних поправок від базової або віртуальної базової станції до роверсного приймача (типово через інтернет-сервіси NTRIP); за сприятливих умов фіксована роздільна здатність дає планову точність до ≈ 2 см і дає змогу оперативно контролювати положення об'єктів і марок на інженерних спорудах (рис. 2). PPK (Post-Processed Kinematic) реалізує той самий кінематичний принцип,

але з відкладеним розв'язанням фазових неоднозначностей у постобробленні; метод особливо ефективний у зніманні з безпілотних літальних апаратів, коли неперервний канал зв'язку з базовою станцією відсутній або нестабільний, а вимоги щодо точності — сантиметрового

рівня на всій траєкторії польоту. Сукупне використання цих режимів забезпечує відтворений баланс між точністю, латентністю і ресурсними витратами в комплексних схемах моніторингу деформацій.

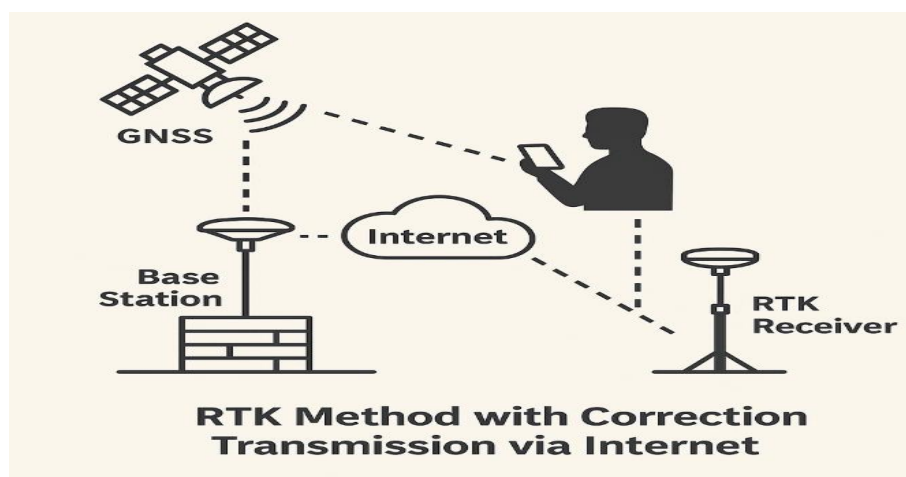


Рис. 2. Схема роботи RTK-методу з передаванням корекцій через інтернет

Постійно діючі референсні станції (CORS, Continuously Operating Reference Stations) формують регіональні та національні мережі, що забезпечують безперервне визначення поправок до навігаційних вимірювань і є стандартом просторово-часової прив'язки у вищій геодезії [3]. В Україні функціонує кілька сегментів таких мереж (зокрема UA-EUPOS, System.NET, GeoTerrace), які дають змогу отримувати високоточні координати без розгортання власної базової станції, а також підтримують мережеві RTK-сервіси з різними стратегіями формування поправок

(VRS, FKP, MAC) [3, 16]. Передавання диференційних GNSS-поправок здійснює протокол NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), який забезпечує доступ мобільних приймачів до NTRIP-кастерів і потоків у форматах RTCM 2.3/3.x, автентифікацію користувачів і вибір потрібного mountpoint (точки доступу). Узагальнені характеристики охоплення й доступу наведено в табл. 2 (кількість станцій, географічне покриття, підтримувані формати поправок, умови доступу); ці дані є підставою для раціонального вибору сервісу в конкретному регіоні.

Таблиця 2

Порівняння характеристик CORS-мереж України

Назва мережі	Кількість станцій	Покриття	Формат поправок	Доступ
UA-EUPOS	60+	Уся країна	RTCM 3.x	Комерційний
System.NET	25+	Центр, Південь	RTCM 3.x	Комерційний
GeoTerrace	15+	Київ, область	RTCM 2.3/3.x	Безкоштовно для ЗВО

Метод InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ґрунтований на фазовій різниці між радарними знімками, отриманими з різних орбітальних епох, і дає змогу оцінювати лінійно-візувальні (LOS) зміщення поверхні з міліметровою чутливістю на великих просторових площах без розгортання наземної апаратури [6, 20]. У дослідженні застосовано кілька реалізацій InSAR: DInSAR для детекції змін між двома датами; PS-InSAR для стабільних відбивачів (будівлі, інженерні споруди) із

формуванням часових рядів швидкостей; SBAS для зменшення декореляції за рахунок підбору коротких базових ліній у просторі та часі. Результати PS-InSAR наведено на рис. 3, де подано карту осідань міської території з класами швидкостей (0 мм/р.; 1–2; 2–3; 3–4; >4 мм/р.): домінування червоних і помаранчевих маркерів у центральній частині свідчить про просторово зосереджені негативні тренди, які узгоджуються з гідрогеологічними умовами та конфігурацією інженерних комунікацій.

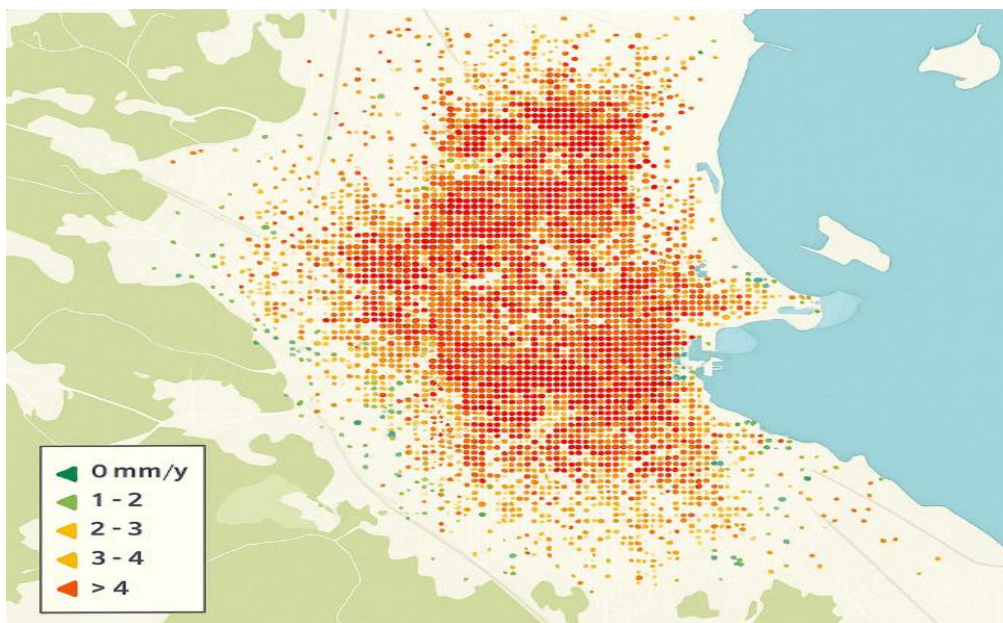


Рис. 3. Карта осідань ґрунту в районі великого міста, отримана методом PS-InSAR

У поєднанні з мережевими RTK-сервісами CORS ці InSAR-оцінки забезпечують як абсолютну прив'язку (через GNSS), так і високу площинну щільність спостережень (через PS/SBAS), що є критично важливим для виявлення і картографування повільних деформацій у міських агломераціях.

У сучасних схемах моніторингу деформацій дедалі ширше застосовують інтегровані підходи, що поєднують супутникові визначення (GNSS), радарну інтерферометрію (InSAR) і високоточні наземні спостереження (прецизійне

нівелювання, тахеометрія). Такі мультисенсорні конфігурації дають змогу одночасно забезпечити абсолютну прив'язку і часову безперервність (через GNSS), високу площинну щільність і регулярність покриття (через InSAR), локальну метрологічну верифікацію на критичних відмітках (через наземні вимірювання), що в підсумку підвищує точність, зменшує вартість широкомасштабного контролю і підтримує роботу в умовах складної радіонавігаційної обстановки (урбан-каньйон, екранування, лісові масиви) [1, 18].

Порівняльні характеристики окремих і комбінованих технологій подано в табл. 3. У типових виробничих умовах GNSS забезпечує локальний контроль із вертикальною точністю порядку 3–5 мм і латентністю до секунд (режими RTK/PPP-RTK), InSAR дає карти швидкостей на площах у десятки квадратних кілометрів із чутливістю близько 5–10 мм і періодичністю оновлення від днів до тижнів, тоді як гібридні конфігурації

завдяки взаємній калібрувально-валідаційній ролі складників досягають інтегрованої точності 2–3 мм за гнучких вимог щодо частоти оновлення та зі збереженням прийнятної собівартості. Саме така синергія лежить в основі оперативних карт деформацій і локальної діагностики «гарячих» ділянок, подібних до наведеної карти осідань міської території, отриманої методом PS-InSAR.

Таблиця 3

Порівняння GNSS, InSAR і гібридних методів для моніторингу деформацій

Метод	Просторове охоплення	Точність за висотою	Частота оновлення	Вартість
GNSS	Локальне	3–5 мм	Секунди	Висока
InSAR	Десятки квадратних кілометрів	5–10 мм	Дні/тижні	Середня
Гібридний	Локальне + регіональне	2–3 мм	Залежить від поєднання	Середня

Подальший розвиток інструментарію очікувано зосередиться на нарощуванні сузір'їв і частот GNSS, широкому впровадженні сервісів PPP-RTK із секундною конвергенцією, інтеграції алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого аналізу великих масивів часових рядів, розширенні відкритого доступу до радарних даних, що зменшує бар'єри масштабування моніторингових систем.

Реалізація високоточних спостережень спирається на узгоджений комплекс апаратно-програмних засобів і регламентованих процедур. Станція супутникової геодезії типово включає багаточастотний GNSS-приймач (L1/L2/L5), який забезпечує моделювання й приглушення іоносферних впливів, антену з протимультитупними характеристиками, польовий контролер/реєстратор із бездротовою комунікацією для керування сесіями та комунікаційні модулі для приймання мережових поправок у реальному часі (NTRIP через GSM/3G/4G/IPv6). Наземні

засоби залишаються обов'язковою складовою для калібрування та незалежної валідації: електронні тахеометри забезпечують кутову точність до 1" і дальномірну похибку $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm})$, тоді як цифрові нівеліри дають змогу визначати перевищення з точністю до 0,3 мм/км ходу. Рациональне поєднання цих компонентів із супутниковими та радарними спостереженнями формує відтворюваний виробничий пайплайн, сумісний із вимогами фахового моніторингу деформацій.

Для відтворюваного опрацювання та інтеграції геодезичних даних застосовують спеціалізовані програмні комплекси, що охоплюють увесь цикл — від первинної обробки вимірювань до побудови картографічних продуктів і звітної документації. У сегменті постоброблення GNSS-спостережень широко використовують RTKLIB — відкритий програмний пакет, придатний для статичних і кінематичних схем, фіксації фазових неоднозначностей, оцінювання якості (PDOP, AR-ratio) і моделювання

атмосферних затримок. Разом із ним застосовують комерційні програмні середовища, зокрема Trimble Business Center, Leica Geo Office і Topcon Magnet, які пропонують розширені засоби мережевого урівноваження, підтримку сервісів PPP/PPP-RTK, розвинені модулі контролю якості, управління метаданими та формування звітів.

Для інтерферометричного аналізу радарних знімків InSAR використовують набір галузевих інструментів: SNAP (ESA) для передоброблення, ко-реєстрації, формування інтерферограм і прикладних корекцій; StaMPS для методів стійких відбивачів (PSI) і часових серій; GMTSAR для побудови інтерферометричних ланцюжків і просторового аналізу. Ці пакети забезпечують повний технологічний ланцюг — від орбітальних продуктів і топокорекцій до розмотування фази, атмосферних поправок і побудови карт швидкостей деформацій із оцінюванням невизначеностей.

Інтеграцію результатів різнотипних спостережень і їхню подальшу візуалізацію виконують у середовищах ГІС. ArcGIS та QGIS забезпечують створення та ведення геоданих у структурі геобаз, узгодження результатів у заданій референційній системі (ITRF/ETRS/УСК-2000), розроблення

картографічних композицій із контрольованою символікою та масштабом, а також автоматизацію повторюваних процедур через моделі робочих процесів (ModelBuilder/Processing Toolbox).

Порівняння метрологічних характеристик типових приладів, що використовують у вищій геодезії, наведено в табл. 4. Дані подано за паспортними специфікаціями виробників і типовими умовами застосування: для багаточастотного GNSS-приймача (наприклад класу Trimble R12) у RTK-сценаріях декларована планова точність на рівні 1–2 мм за умови фіксованого розв'язку; електронний тахеометр (класу Leica TS16) забезпечує кутову точність до 1" і далекомірну похибку $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm})$, що уможлиблює високоточні кутово-лінійні побудови та інтеграцію з GNSS-модулями; цифровий нівелір (класу Leica DNA03) забезпечує середню квадратичну похибку ходу близько 0,3 мм/км для прецизійних висотних визначень. Ці значення потрібно інтерпретувати як досяжні за умови дотримання регламентованих процедур спостереження і контролю якості. У виробничих умовах результати залежать від геометрії спостережень, стану рефракційного середовища, мультипугу і якості центрування приладів (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняння точності основних приладів для вищої геодезії

Тип обладнання	Модель	Точність	Особливості
GNSS-приймач	Trimble R12	до 1-2 мм (RTK)	Багаточастотний, підтримка всієї GNSS
Електронний тахеометр	Leica TS16	кутова точність 1", дальність до 5 км	Інтеграція з GNSS-модулями
Високоточний нівелір	Leica DNA03	0.3 мм/км	Автоматичне визначення висот

Актуальний вектор розвитку геодезичного інструментарію визначено мініатюризацією та енергоефективністю апаратури, зростанням рівня сенсорної

інтеграції і переходом до хмароорієнтованих обчислень. У польових платформах, зокрема на БПЛА, дедалі ширше застосовують малогабаритні багаточастотні

GNSS-приймачі з низьким енергоспоживанням, що забезпечують сантиметрову точність за мінімальної маси корисного навантаження. Паралельно розвивають інтегровані навігаційно-вимірні комплекси, у яких модулі GNSS поєднано з інерціальними вимірними блоками (IMU) та оптичними сенсорами; така мультисенсорна архітектура підвищує надійність розв'язку у середовищах зі складною радіонавігаційною обстановкою. Оброблення великих масивів даних і організація спільної роботи команд дедалі частіше реалізовані у хмарних сервісах реального часу, що підтримують автоматизовані конвеєри (pipelines) від приймання даних до візуалізації та випуску звітів. Зростає роль робототехнічних засобів для автономного виконання повторюваних польових операцій, включно з автоматичною постановкою марок, періодичними обстеженнями та дистанційним інструментальним контролем.

Моніторинг деформацій є одним із основних застосувань сучасної вищої геодезії, оскільки забезпечує своєчасний

контроль стану інженерних споруд, природних ландшафтів і урбанізованих територій, що зазнають впливу геодинамічних процесів. Високоточні методи дають змогу детектувати зміщення порядку міліметрів, що критично для безпеки експлуатації та інженерного планування. Типовими об'єктами є мости, висотні будівлі, гідротехнічні споруди та елементи критичної інфраструктури, для яких супутникові технології GNSS забезпечують безперервне спостереження в режимі реального часу та оперативну діагностику.

У регіонах із підвищеною сейсмічною активністю, розвитком карсту або вираженими процесами осідання поверхні доцільним є комбіноване використання GNSS і InSAR [1, 18]. Перший забезпечує локальну абсолютну прив'язку та часову безперервність у контрольних точках, тоді як другий дає широкомасштабні карти швидкостей із високою просторовою деталізацією. Порівняльну характеристику можливостей обох підходів у карстових умовах наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Порівняння результатів моніторингу осідань ґрунту за допомогою GNSS і InSAR у карстовій зоні

Параметр	GNSS-моніторинг	InSAR-моніторинг
Просторова роздільна здатність	Висока (точкові вимірювання)	Висока (до 5–10 м/піксель)
Точність вертикальних зміщень	1–3 мм	2–5 мм
Частота спостережень	Безперервна (реальний час)	Періодична (залежить від орбіти)
Покриття території	Локальне (біля станцій)	Широке (до сотень квадратних кілометрів)
Чутливість до погодних умов	Низька	Висока (залежить від хмарності)
Вартість впровадження	Висока	Середня
Виявлення дрібних деформацій	Висока	Висока
Складність обробки даних	Низька/середня	Висока (інтерферометрія)

Для моніторингу промислових об'єктів — нафтогазових платформ, гірничих виробок, залізничних колій — пріоритетними залишаються високочастотні схеми спостережень із секундною латентністю. Для цього доцільно застосовувати мережеві RTK-GNSS із безперервним каналом зв'язку з серверами поправок, доповнюючи їх періодичними інтерферометричними зйомками для площинної інвентаризації деформаційних полів. Така організація спостережень забезпечує як оперативне виявлення небезпечних змін, так і стратегічне оцінювання довготривалих тенденцій.

Показовим виробничим кейсом є впровадження мережевого RTK-моніторингу на об'єктах нафтогазової інфраструктури Полтавської області: безперервні GNSS-спостереження на марках бурових майданчиків забезпечують сантиметрову оперативну оцінку зміщень і дають змогу своєчасно фіксувати ознаки осідань і зсувних процесів із подальшим автоматизованим сповіщенням про перевищення порогових значень. Така організація спостережень скорочує латентність ухвалення інженерних рішень і підвищує надійність експлуатації.

Моніторинг інфраструктурних об'єктів і транспортних коридорів (залізничні колії, автомобільні дороги, аеродромні покриття) доцільно реалізувати у змішаній схемі, що поєднує GNSS-моніторинг із високоточними тахеометричними зйомками. GNSS забезпечує швидке і регулярне визначення зміщень опорних пунктів мережі контролю та дає часові ряди для виявлення трендів, тоді як тахеометрія виконує геометричне «дошліфування» положення критичних елементів інфраструктури (рейкові нитки, шви покриттів, крайки РД/ЗПС) із міліметровою деталізацією. Інтеграція обох підходів формує відтворюваний вимірювальний каркас із необхідним балансом просторової детальності, частоти оновлення та метрологічної достовірності.

Органічним продовженням змішаних GNSS- і тахеометричних схем є залучення безпілотних літальних апаратів як високо-ефективної платформи дистанційного зондування. БПЛА забезпечують швидке формування фотограмметричних моделей місцевості з просторовою роздільною здатністю до кількох сантиметрів, що робить їх придатними для детальної інвентаризації деформаційних процесів на лінійних і площинних об'єктах. Поєднання аерофотозйомки з GNSS-RTK/PPK-геоприв'язкою центрів проєкції дає змогу отримувати високоточні цифрові моделі рельєфу (ЦМР) і цифрові моделі поверхні (ЦМП) із контрольованим бюджетом похибок; подальший аналіз різницевих поверхонь – виявляти і кількісно оцінювати зміни висотного профілю насипів, укосів, відвалів і кар'єрних уступів.

У виробничій практиці така інтегрована технологія реалізована, зокрема, на кар'єрних полігонах: регулярні зйомки БПЛА в поєднанні з RTK-геоприв'язкою опорних міток (GCP) забезпечують метрологічно відтворювані оцінки балансів мас, швидкостей осідання та локальних зсувних зміщень. Наприклад, компанія «GeoDrone» у Харківській області впроваджує цикл повторних обстежень кар'єрів із використанням БПЛА, що істотно скорочує тривалість і собівартість робіт порівняно з виключно наземними методами, зберігаючи при цьому необхідний рівень точності та просторової детальності.

Разом із тим експлуатаційні умови мають низку обмежень, які необхідно враховувати із плануванням моніторингу. Метеорологічні чинники (хмарність, опади, поривчастий вітер) прямо впливають на якість знімання та стабільність GNSS-розв'язку; урбаністичне та природне екранування (забудова, лісові масиви) підсилює багатопроменевість і може знижувати надійність фіксації фазових неоднозначностей. Додатковими бар'єрами є капітальні та операційні витрати на

високоточне обладнання й ліцензійне програмне забезпечення, а також потреба у кваліфікованому персоналі для коректного виконання фотограмметричної обробки, валідації результатів та інтеграції даних у ГІС-середовище.

Перспективи розвитку практичного моніторингу пов'язані з розгортанням мереж 5G для низьколатентного передавання польових телеметричних даних і потоків поправок, ширшим використанням алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого виявлення й класифікації деформацій у великих часових серіях, а також із залученням мультиспектральних і гіперспектральних зображень для комплексного діагностування стану ґрунтів і конструкцій. Подальша інтеграція супутникових, безпілотних і наземних спостережень у єдине геоінформаційне аналітичне середовище створює передумови для побудови повномасштабних систем раннього попередження з відтворюваною методикою, прозорим оцінюванням невизначеностей і належною регламентацією процедур ухвалення рішень.

Висновки. У роботі узагальнено теоретико-методичні засади сучасної вищої геодезії та показано визначальну роль коректної референц-рамки (ITRF/WGS 84/УСК-2000) та епохозалежних перетворень Гельмерта для інтеграції багатоджерельних спостережень. Доведено, що суворе декларування реалізації та епохи системи координат є необхідною умовою метрологічної узгодженості часових рядів деформацій і відтворюваності результатів, що узгоджено з чинними рекомендаціями IERS та національною практикою.

Аналіз і апробація методів вимірювань підтвердили, що GNSS/CORS у статичних, швидкостатичних і кінематичних режимах забезпечує сантиметрово-міліметрову точність і високу темпоральну роздільну здатність, тоді як PS/SBAS-InSAR дає

площинні карти швидкостей із міліметровою чутливістю на великих територіях. Запропонований «end-to-end» каркас злиття GNSS і InSAR у єдиній референційній системі — з модельною компенсацією атмосферних впливів і валідацією за контрольними пунктами — зменшує систематичні зсуви, підвищує достовірність карт деформацій і забезпечує інтегровану чутливість на рівні 2–3 мм. Практичні приклади (оперативний RTK-контроль вузлових точок інженерних споруд і площинне картографування міських осідань за PS-InSAR) демонструють взаємодоповнюваність підходів і співмірні з опублікованими вітчизняними та закордонними результатами показники точності.

Техніко-економічне зіставлення свідчить на користь гібридних конфігурацій: використання InSAR як фонового широкомасштабного моніторингу із помірною собівартістю в поєднанні з GNSS/нівелюванням для абсолютної прив'язки, калібрування та високочастотного контролю на критичних відмітках забезпечує оптимальний баланс вартості, латентності, точності. Сформульовано вимоги щодо автоматизації виробничого циклу (порогові критерії спрацювання, регламенти валідації, інтеграція в ГІС-середовище) як основу для систем раннього попередження. Подальші дослідження доцільно зосередити на розширенні відкритих бенчмарків для порівняльної оцінки в різних інженерно-геологічних умовах, упровадженні сервісів PPP-RTK із малою конвергенцією, застосуванні методів штучного інтелекту для детекції аномалій у часових рядах і поглибленні процедур невизначеного моделювання, що підвищить точність, швидкодію і масштабованість геодезичного моніторингу та зміцнить його відповідність найкращим міжнародним практикам.

Список використаних джерел

1. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.land.gov.ua/> (дата звернення: 01.09.2025).
2. Fabris M., Floris M. Integrated GNSS and insar analysis for monitoring the shoulder structures of the MOSE system in venice, italy. *Remote sensing*. 2025. Vol. 17, No. 6. P. 1059. URL: <https://doi.org/10.3390/rs17061059> (date of access: 18.08.2025).
3. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2001. Vol. 39, No. 1. P. 8–20. URL: <https://doi.org/10.1109/36.898661> (date of access: 18.08.2025).
4. Gis technologies in land valuation: european experience for improving ukrainian practice / I. Sadovyy et al. *Municipal economy of cities*. 2025. Vol. 3, No. 191. P. 440–446. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-440-446> (date of access: 10.08.2025).
5. Ground-based InSAR and GNSS integration for enhanced dam monitoring / M. Rebmeister et al. *Applied geomatics*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-025-00622-w> (date of access: 11.08.2025).
6. Hanssen R. F. Radar interferometry. Dordrecht : Springer Netherlands, 2001. URL: <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9> (date of access: 11.08.2025).
7. Identifying wind turbines from multiresolution and multibackground remote sensing imagery / Y. Zhai et al. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 2024. Vol. 126. P. 103613. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103613> (date of access: 01.09.2025).
8. Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1987. 23(3). 325–331.
9. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS satellite surveying. Hoboken, NJ. USA : John Wiley & Sons, Inc. 2015. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119018612> (date of access: 02.09.2025).
10. Lichtenegger H., Hofmann-Wellenhof B., Wasle E. GNSS – global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, galileo, and more. Springer. 2007. 518 p.
11. Mohylnyi S., Khainus D., Vynohradenko S. Analysis of the accuracy of cadastral surveys using UaVs. *Ukrainian journal of applied economics and technology*. 2024. Vol. 9, No. 1. P. 146–151. URL: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-1-24> (date of access: 04.09.2025).
12. Overview and analysis of ground subsidence along china's urban subway network based on synthetic aperture radar interferometry / S. Wang et al. *Remote sensing*. 2024. Vol. 16, No. 9. P. 1548. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16091548> (date of access: 18.08.2025).
13. Petrov L. Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *Journal of geophysical research*. 2004. Vol. 109, B3. URL: <https://doi.org/10.1029/2003jb002500> (date of access: 04.08.2025).
14. Petit G., Luzum B. (eds.). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note No. 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
15. Review of PPP–RTK: achievements, challenges, and opportunities / X. Li et al. *Satellite navigation*. 2022. Vol. 3, No. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00089-9> (date of access: 16.08.2025).
16. RTKLIB: an open source program package for GNSS positioning. *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*. URL: <https://www.rtklib.com/> (date of access: 16.08.2025).
17. Seeber G. Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. de Gruyter GmbH, Walter, 2008.

18. State service of ukraine for geodesy, cartography and cadastre (stategeocadastre) | eurogeographics. *EuroGeographics*. URL: <https://eurogeographics.org/member/state-service-of-ukraine-for-geodesy-cartography-and-cadastre-stategeocadastre/> (date of access: 14.08.2025).
 19. STEP – science toolbox exploitation platform. *STEP – Science Toolbox Exploitation Platform*. URL: <https://step.esa.int/main/> (date of access: 04.09.2025).
 20. The use of GIS technologies for geodetic monitoring / D. D. Khainus et al. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2023. Vol. 1254, No. 1. P. 012137. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012137> (date of access: 04.09.2025).
-

Хайнус Дмитро Дмитрович, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6097-1464>. Тел.: +38 (095) 926-61-19. E-mail: dmitry.khainus@gmail.com.
Могильний Сергій Георгійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0158-5672>. E-mail: mogilnyy.sg@gmail.com.
Винограденко Сергій Олександрович, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8520-6504>. Тел.: +38 (098)-465-04-18. E-mail: s.vinogradenko15@gmail.com.
Капінос Наталія Олександрівна, кандидат економічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії та землеустрою, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9354-5311>. Тел.: +38 (066) 569-45-22. E-mail: nataliia.kapinos@snau.edu.ua.

Khainus Dmytro PhD (Econ.) Associate Professor, Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6097-1464>. Tel.: +38 (095) 926-61-19. E-mail: dmitry.khainus@gmail.com.
Mohylnyi Serhii Dr. Sc. (Tech.) Professor, Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, Kharkiv State Biotechnological University, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0158-5672>. E-mail: mogilnyy.sg@gmail.com.
Vynohradenko Serhii PhD (Econ.) Associate Professor, Department of Land Resources Management, Geodesy and Cadastre, Kharkiv State Biotechnological University, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8520-6504>. Tel.: +38 (098)-465-04-18. E-mail: s.vinogradenko15@gmail.com.
Nataliia Kapinos PhD (Econ.) Associate Professor, Department of Geodesy and Land Management, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9354-5311>. Tel.: +38 (066) 569-45-22. E-mail: nataliia.kapinos@snau.edu.ua.

Статтю прийнято 18.09.2025 р.