ISSN 2306-1677 (Print) ISSN 2518-7325 (On-line)
Отримано: 28.07.2026; Прийнято: 12.08.2026; Опубліковано: 30.12.2026;
УДК 004.424.22:528.235 http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.04.16

# GNSS-МОНІТОРИНГ ДЕФОРМАЦІЙ ПОРУШЕНИХ ТЕРИТОРІЙ ДЛЯ ПОТРЕБ БУДІВНИЦТВА

***Є.Ю. БЕРЕЗАН,***
*аспірант кафедри технології будівельних виробів,*
*матеріалів та конструкцій*
*E-mail – berezanevg@gmail.com*
*ID ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0647-4811*
*Криворізький національний університет*
***Є.Г. ХЛИПОВКА,***
*старший викладач кафедри геодезії*
*E-mail –hevgeng@knu.edu.ua*
*ID ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0855-8475*
*Криворізький національний університет*

***Анотація.*** *У статті розглянуто актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності геодезичного забезпечення будівництва на техногенно порушених територіях шляхом впровадження сучасних технологій глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Значна частина територій, що зазнали впливу гірничодобувної діяльності, характеризується розвитком повільних деформаційних процесів, які можуть негативно впливати на стійкість основ будівель і споруд, інженерних мереж та об'єктів інфраструктури. У зв'язку з цим виникає необхідність створення високоточної системи моніторингу, здатної забезпечити своєчасне виявлення просторових зміщень земної поверхні та прогнозування розвитку небезпечних геодинамічних процесів.*

*Метою дослідження є наукове обґрунтування та розроблення комплексної методики GNSS-моніторингу деформацій техногенно порушених територій, орієнтованої на використання у процесі інженерних вишукувань, проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів цивільного і промислового призначення.*

*Запропонована методика базується на застосуванні автономних GNSS-реперних станцій, високоточних статичних супутникових спостережень, сучасних програмних комплексів обробки GNSS-вимірювань та методів статистичного аналізу часових рядів координат.*

*У роботі запропоновано конструкцію автономної реперної станції, яка об'єднує багаточастотний багатосистемний GNSS-приймач, систему автономного електроживлення на основі сонячних панелей, контролер керування, модуль бездротової передачі інформації та блок локального збереження даних. Запро-*

*Науковий керівник: В.В. Перегудов, доктор технічних наук, професор*

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

*поновane технічне рішення забезпечує можливість тривалого безперервного функціонування мережі моніторингу без постійного обслуговування персоналом. Оригінальність конструкції підтверджується патентним рішенням, що забезпечує практичну цінність запропонованої системи.*

*Обґрунтовано вибір оптимальних параметрів організації статичних GNSS-спостережень, включаючи тривалість сеансів вимірювань, інтервал реєстрації супутникових сигналів, періодичність циклів спостережень, вимоги до геометрії супутникового сузір'я та критерії оцінювання якості отриманих результатів. Розроблено алгоритм обробки GNSS-даних із використанням програмних комплексів Bernese GNSS Software, GAMIT/GLOBK, Trimble Business Center та Leica Infinity, що забезпечує автоматизоване визначення координат контрольних реперів, формування часових рядів зміщень та оцінювання їх статистичної достовірності.*

***Ключові слова:*** *GNSS-моніторинг, деформації інженерних споруд, геодезичний моніторинг, супутникові вимірювання, геодезичний контроль, точність вимірювань, автоматизована обробка даних, економічна ефективність моніторингу.*

## *Актуальність*

Освоєння техногенно порушених територій для потреб будівництва є складною науково-технічною проблемою, актуальність якої зростає в умовах розширення міської забудови та дефіциту вільних земельних ресурсів. До таких територій належать ділянки, підроблені підземними гірничими виробками, зони впливу відкритих гірничих робіт, рекультивовані відвали й полігони відходів, території ліквідованих шахт, підземних порожнин та інших техногенних об’єктів. Особливої актуальності ця проблема набуває у гірничопромислових регіонах України, зокрема в межах Криворізького басейну, Придніпров’я та Донбасу, де значна частина перспективних будівельних майданчиків характеризується порушеною геологічною будовою, неоднорідністю ґрунтової основи та тривалим проявом техногенних геодинамічних процесів [1].

Будівництво та подальша експлуатація споруд на таких територіях супроводжуються підвищеним ризиком виникнення нерівномірних осідань, горизонтальних зміщень, локальних просідань, зсувних процесів і деформацій земної поверхні. Зазначені явища можуть спричиняти зміну проєктного положення фундаментів, утворення тріщин у несучих конструкціях, порушення роботи інженерних мереж і зниження експлуатаційної надійності будівель. Тому своєчасне виявлення просторових переміщень земної поверхні та конструктивних елементів є необхідною умовою забезпечення безпеки будівництва і прогнозування подальшого розвитку деформаційних процесів [5].

Традиційні методи геодезичного контролю, до яких належать високоточне геометричне нівелювання, тахеометричні вимірювання та лінійно-кутові побудови, забезпечують високу точність визначення деформацій, проте переважно мають дискретний характер. Отримання результатів можливе лише у визначені моменти проведення польових спостережень, а їх регулярне повторення потребує значних трудових і часових витрат, постійної

присутності персоналу та забезпечення стабільної видимості між пунктами. На важкодоступних, нестійких або потенційно небезпечних ділянках такі обмеження можуть ускладнювати оперативне отримання інформації та знижувати ефективність моніторингу.

Застосування глобальних навігаційних супутникових систем створює передумови для переходу від періодичного геодезичного контролю до автоматизованого безперервного моніторингу. GNSS-технології забезпечують визначення тривимірних координат контрольних пунктів, накопичення часових рядів спостережень, дистанційну передачу даних та оперативне виявлення просторових зміщень. За умови використання геодезичних багаточастотних приймачів, стабільних пунктів, тривалих сеансів спостережень і точного постоброблення може досягатися міліметровий рівень визначення горизонтальних переміщень і кількаміліметровий рівень визначення вертикальних деформацій. У режимі RTK точність, як правило, має сантиметровий рівень і залежить від довжини базової лінії, геометрії супутникового сузір'я, стану атмосфери, багатопроменевості сигналів і якості прив'язки до референцної мережі [6].

Отже, актуальним науковим завданням є обґрунтування структури GNSS-моніторингу техногенно порушених територій, визначення оптимальної конфігурації контрольної мережі, встановлення періодичності та тривалості спостережень, оцінювання точності визначення просторових переміщень і розроблення критеріїв виявлення небезпечних деформацій. Результати такого моніторингу можуть бути використані для оцінювання придатності територій до забудови, контролю стану будівельних майданчиків, прогнозування розвитку деформацій та своєчасного прийняття інженерних рішень щодо забезпечення надійності й безпеки будівель і споруд [7].

## *Аналіз останніх досліджень та публікацій*

Питання геодезичного контролю деформацій земної поверхні та інженерних споруд із використанням глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) активно досліджуються впродовж останніх десятиліть. Особлива увага приділяється створенню високоточних систем моніторингу для прогнозування небезпечних деформацій, оцінювання стійкості техногенно порушених територій та забезпечення безпечної експлуатації будівельних об'єктів.

Blewitt G. одним із перших обґрунтував можливість використання супутникових технологій GPS для високоточного визначення просторових координат у задачах геодинамічного моніторингу. Автор підтверджує, що застосування фазових вимірювань дозволяє визначати зміщення контрольних пунктів із міліметровою точністю та використовувати GNSS як ефективний інструмент дослідження повільних деформацій земної поверхні. Такий підхід, згідно з дослідженнями Blewitt G., полягає у створенні постійно діючих мереж спостережень, накопиченні часових рядів координат та їх статистичній обробці для виявлення тенденцій просторових переміщень [8].

Подальший розвиток методології GNSS-моніторингу отримав у роботах Teferle F.N., який доводить, що безперервні супутникові спостереження забезпечують можливість реєстрації як довготривалих геодинамічних про-

цесів, так і локальних деформацій інженерних споруд. Автор зазначає, що інтеграція GNSS-мереж із сучасними алгоритмами математичного моделювання значно підвищує достовірність прогнозування розвитку деформаційних процесів [9].

Дослідження Vernant P. підтверджують ефективність використання постійно діючих GNSS-станцій для визначення сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори. Запропонований автором підхід базується на комплексному аналізі часових рядів координат, що дозволяє відокремити природні геодинамічні процеси від локальних техногенних деформацій та підвищити надійність оцінювання просторових зміщень [10].

Серед українських науковців вагомий внесок у розвиток супутникових геодезичних технологій зробили Тревого І. С. та Шевченко Т. Г. У своїх роботах автори підтверджують перспективність використання GNSS-технологій під час геодезичного забезпечення інженерних вишукувань, моніторингу деформацій будівель і споруд та створення високоточних геодезичних мереж. Запропонований ними підхід полягає у комплексному використанні супутникових вимірювань, класичних геодезичних методів та сучасного програмного забезпечення для підвищення точності визначення просторових координат контрольних пунктів [4].

Проблематику геодезичного моніторингу техногенно порушених територій у гірничодобувних регіонах України досліджував Хоменко П. А. Автор зазначає, що території, порушені гірничими роботами, характеризуються складними просторово-часовими деформаційними процесами, які потребують систематичного геодезичного контролю. У своїх роботах він наголошує на доцільності використання сучасних супутникових технологій для своєчасного виявлення небезпечних деформацій земної поверхні та прогнозування їх подальшого розвитку [5].

Разом із тим аналіз сучасних наукових праць свідчить, що більшість досліджень присвячена геодинамічному моніторингу земної кори, контролю деформацій окремих інженерних споруд або створенню постійно діючих GNSS-мереж. Значно менше уваги приділено питанням комплексного моніторингу техногенно порушених територій саме для потреб будівництва, коли необхідно одночасно оцінювати стійкість основи, розвиток просторових деформацій та придатність території до забудови.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень підтверджує високий потенціал використання GNSS-технологій для геодезичного контролю деформацій, проте відсутня комплексна методика, яка б поєднувала безперервний супутниковий моніторинг, сучасні методи математичного аналізу часових рядів, оцінювання просторових переміщень та інженерне обґрунтування придатності техногенно порушених територій до будівництва. Саме розроблення такого комплексного підходу визначає наукову новизну та практичну спрямованість даного дослідження.

***Мета даного дослідження.*** Метою дослідження є наукове обґрунтування та розроблення комплексної методики GNSS-моніторингу деформацій техногенно порушених територій із використанням автономних реперних станцій, спрямованої на підвищення точності визначення просторових зміщень, оцінювання

стійкості ґрунтової основи та забезпечення геодезичного супроводу будівництва на територіях із підвищеним техногенним навантаженням.

## *Матеріали і методи дослідження*

Досягнення поставленої мети забезпечується впровадженням комплексного підходу, який поєднує сучасні супутникові геодезичні технології, методи математичної обробки просторових даних та інструменти геоінформаційного аналізу для оцінювання деформацій техногенно порушених територій. Методологія дослідження базується на принципах безперервного геодезичного моніторингу, що забезпечує отримання високоточних координат контрольних пунктів, аналіз їх часових рядів та своєчасне виявлення небезпечних змін просторового положення земної поверхні.

Матеріальною основою дослідження є мережа автономних GNSS-реперних станцій, обладнаних багаточастотними багатосистемними приймачами, здатними одночасно приймати сигнали навігаційних систем GPS, Galileo та BeiDou. Залежно від вимог до точності спостережень можуть застосовуватися геодезичні приймачі Leica GS18 T, Trimble R10-2, Topcon HiPer HR або високоточні модулі u-blox ZED-F9P. Для забезпечення автономного функціонування станції оснащуються сонячними панелями, акумуляторними системами живлення, контролерами керування, модулями бездротової передачі інформації та накопичувачами даних. Така конструкція дозволяє виконувати довготривалий моніторинг без постійної присутності оператора та мінімізує вплив людського фактора на результати вимірювань, рис.1.

Програмне забезпечення дослідження включає комплекс спеціалізованих пакетів для обробки супутникових спостережень і статистичного аналізу координат, таблиця 1. Для високоточного визначення координат використовуються програмні комплекси Bernese GNSS Software, GAMIT/GLOBK, Trimble Business

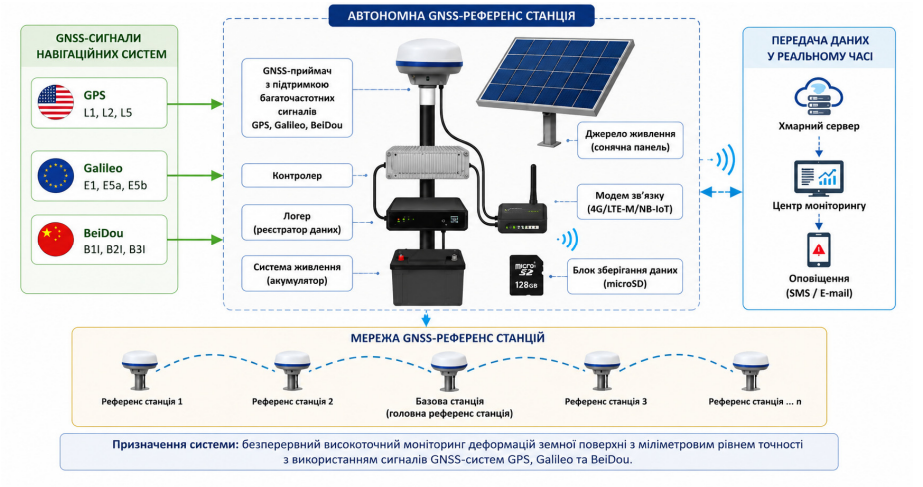


**Рис. 1 Структурна схема автономії GNSS – реперної станції**

**1. Функціональні можливості програмного забезпечення**

| Програмне забезпечення | Клас ПЗ | Основне застосування | Результат |
|---|---|---|---|
| Bernese GNSS Software | Наукове | Постобробка GNSS | Координати мм-точності |
| GAMIT/GLOBK | Наукове | Аналіз часових рядів | Вектори зміщень |
| Trimble Business Center | Комерційне | Обробка польових даних | Контроль якості вимірювань |
| Leica Infinity | Комерційне | Комплексна обробка геодезичних вимірювань | Урівнювання мереж |
| QGIS | GIS | Просторовий аналіз | Карти деформацій |
| ArcGIS Pro | GIS | Геостатистичне моделювання | Просторові моделі та прогнозування |

Center та Leica Infinity, які забезпечують автоматизовану обробку фазових вимірювань, усунення систематичних похибок, оцінювання якості вимірювань і визначення просторових координат у державній та глобальній системах координат. Просторову інтерпретацію результатів виконують із використанням геоінформаційних систем QGIS та ArcGIS, що дозволяє будувати карти зміщень, ізолінії деформацій і моделі просторового розподілу небезпечних зон.

Аналіз функціональних можливостей програмного забезпечення свідчить, що використання комплексу наукових пакетів (Bernese GNSS Software, GAMIT/GLOBK) забезпечує високоточне визначення координат контрольних пунктів та оцінювання параметрів деформаційних процесів, тоді як комерційні програмні продукти (Trimble Business Center, Leica Infinity) дозволяють ефективно виконувати первинну обробку польових вимірювань і контроль якості даних. Застосування геоінформаційних систем (QGIS, ArcGIS Pro) забезпечує просторову візуалізацію результатів, побудову карт зміщень, цифрових моделей поверхні та геостатистичний аналіз деформацій, що є необхідною складовою комплексного GNSS-моніторингу порушених територій. Програмне забезпечення включає: наукові програми обробки GNSS-спостережень (Bernese 5.4, GAMIT 10.7); комерційні пакети (Trimble Business Center, Leica Infinity); програми аналізу часових рядів (HECTOR, CATS); ГІС-інструменти для просторової візуалізації результатів (QGIS, ArcGIS).

Важливим практичним результатом виконаного дослідження є розроблення конструкції автономної GNSS-реперної станції, технічне рішення якої захищено заявкою на патент України, прийнятою до розгляду Українським національним офісом інтелектуальної власності та інновацій. Запропонована конструкція поєднує багаточастотний GNSS-модуль, автономну систему електроживлення, засоби бездротової передачі даних та локального збереження інформації, що забезпечує можливість безперервного високоточного моніторингу деформацій техногенно порушених територій. Технічне рішення захищає оригінальну компоновку функціональних вузлів станції, що забезпечує її автономність, захищеність від атмосферних впливів та придатність до тривалого безперервного функціонування в польових умовах без технічного обслуговування.

Паралельно ведеться розробка власного програмного забезпечення

для моніторингу деформацій у режимі реального часу. Програма призначена для автоматизованого збору та обробки GNSS-даних із реперних станцій мережі, їх фільтрації, обчислення зміщень та графічної візуалізації деформаційних процесів. Передбачено функції автоматичного оповіщення при перевищенні порогових значень зміщень, що дозволить оперативно реагувати на небезпечні деформаційні тенденції безпосередньо в процесі будівництва або експлуатації споруди. Впровадження власного програмного рішення дозволить відмовитися від закордонних пакетів і забезпечить повну адаптацію системи до вітчизняної нормативної бази.

Дослідну ділянку для проведення GNSS-моніторингу обирали з урахуванням її репрезентативності для техногенно порушених територій та наявності тривалого антропогенного навантаження, здатного спричиняти сучасні деформаційні процеси земної поверхні. Як об'єкт дослідження рекомендується використовувати території рекультивованих відвалів, колишніх промислових майданчиків, зон впливу відкритих або підземних гірничих робіт, які є потенційно придатними для подальшого цивільного або промислового будівництва. Вибір дослідної території здійснювався відповідно до комплексу геодезичних, геотехнічних та експлуатаційних критеріїв, що забезпечують можливість виконання високоточних GNSS-спостережень. Основними критеріями відбору представлені в таблиці 2.

На вибраній території створювалася локальна геодезична мережа, що включала один базовий репер, розташований поза межами активної зони деформацій, та систему контрольних реперів, рівномірно розміщених у межах дослідної ділянки. Базовий репер використовувався як опорний пункт для визначення абсолютних координат, тоді як контрольні репери забезпечували реєстрацію просторових переміщень окремих ділянок території.

Запропонована конфігурація мережі дозволяє одночасно визначати абсолютні координати контрольних пунктів, оцінювати відносні зміщення між окремими реперами, аналізувати просторовий характер розвитку деформацій та формувати часові ряди спостережень, необхідні для прогнозування геодинамічних процесів.

**2. Критерії вибору дослідної ділянки для GNSS-моніторингу**

| **Критерій** | **Характеристика** | **Значення для дослідження** |
|---|---|---|
| Тип території | Рекультивований відвал, промислова зона, підроблена територія | Об'єкт дослідження |
| Наявність деформацій | Осідання, горизонтальні зміщення, локальні просідання | Контроль розвитку геодинамічних процесів |
| Перспективи забудови | Цивільне або промислове будівництво | Оцінювання придатності території |
| Відкритість небосхилу | Кут відсічення супутників ≥15° | Забезпечення стабільного прийому GNSS-сигналів |
| Електромагнітні умови | Мінімальний рівень перешкод | Зменшення впливу похибок вимірювань |
| Наявність CORS | Відстань до найближчої станції ≤30–50 км | Підвищення точності визначення координат |
| Геологічні умови | Стабільність базового репера | Забезпечення незмінності вихідної точки |




**Рис. 2 – Дослідна ділянка GNSS -моніторингу техногенно порушеної території**

Загальна методика організації робіт включає вибір дослідної ділянки, створення мережі автономних GNSS-реперів, налаштування параметрів збору даних, проведення статичних супутникових спостережень, постобробку GNSS-вимірювань, статистичний аналіз часових рядів координат і просторову інтерпретацію результатів. Послідовність виконання зазначених етапів наведено на рис. 2.

Польові вимірювання проводилися у статичному режимі GNSS-спостережень, що є найбільш ефективним для визначення повільних деформацій земної поверхні, таблиця 3. Реєстрація супутникових сигналів здійснювалася з інтервалом 30 секунд, тривалість одного сеансу становила від 4 до 8 годин, а цикли спостережень виконувалися один раз на квартал для забезпечення можливості аналізу сезонних і довготривалих тенденцій розвитку деформацій. Для підвищення достовірності результатів використовувався кут відсічення супутників не менше 15°, контроль геометрії супутникового сузір'я за значенням показника DOP та

**3. Параметри проведення статичних GNSS-спостережень**

| Параметр | Значення | Призначення |
|---|---|---|
| Режим спостережень | Статичний | Визначення повільних деформацій |
| Інтервал реєстрації | 30 с | Формування часового ряду вимірювань |
| Тривалість одного сеансу | 4–8 год | Надійне визначення фазових неоднозначностей |
| Періодичність спостережень | 1 раз на квартал | Аналіз сезонних і довготривалих змін |
| Мінімальний кут відсічення | ≥15° | Усунення низькокутових супутників |
| Мінімальна кількість супутників | ≥4 | Забезпечення стійкого позиціонування |
| Бажана кількість супутників | 10–25 | Підвищення точності координат |
| Максимальне значення PDOP | ≤4 | Контроль геометрії супутникового сузір'я |
| Формат збереження | RINEX 3.x | Стандарт IGS для наукової обробки |

запис даних у міжнародному форматі RINEX 3.x.

Сирі GNSS-дані обробляються у програмному забезпеченні наукового класу (Bernese GNSS Software або GAMIT/GLOBK). Обробка включає: попередню обробку з відбраковуванням грубих похибок; формування подвійних різниць фазових вимірювань для усунення систематичних похибок; визначення цілочисельних значень фазових неоднозначностей методами LAMBDA або FARA [7, 12].

Величини зміщень обчислюються як різниця координат відповідних реперів між двома суміжними циклами спостережень. Вертикальні зміщення (ΔH) визначаються за компонентою Up у місцевій топоцентричній системі координат. Планові зміщення характеризуються компонентами North (ΔN) та East (ΔE) та результуючим горизонтальним вектором $D = \sqrt{(\Delta N^2 + \Delta E^2)}$.

Типові часові ряди вертикальних зміщень реперів для модельної ділянки представлені на рис. 3.

Статистичне оцінювання достовірності отриманих результатів є обов'язковим етапом обробки GNSS-спостережень, оскільки дозволяє відокремити реальні деформаційні процеси від випадкових похибок вимірювань. Після урівнювання мережі для кожного контрольного репера визначаються середньоквадратичні похибки координат, які характеризують точність визначення просторового положення пунктів спостережень.

Критерієм виявлення деформацій є перевищення величиною зміщення рівня випадкових похибок вимірювань. У геодезичній практиці загальноприйнятим вважається правило «трьох сигм», згідно з яким зміщення визнається статистично значущим, якщо його абсолютна величина перевищує потрійне значення середньоквадратичної похибки відповідного параметра. Для вертикальної компоненти ця умова має вигляд

$$|\Delta H| > 3\sigma\Delta H, \quad (1)$$

а для результуючого горизонтального зміщення

$$|D| > 3\sigma D, \quad (2)$$

де ΔH - вертикальне зміщення контрольного репера між двома суміжними циклами спостережень; D - модуль горизонтального вектора зміщення; σ ΔH та Σd - середньоквадратичні похибки визначення відповідних величин.

Використання критерію 3σ забезпечує ймовірність понад 99,7 % того, що зафіксоване зміщення не є наслід-

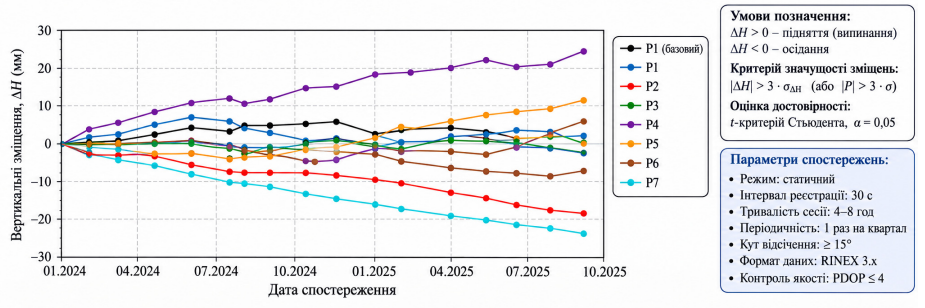


**Рис. 3. Часовий ряд вертикальних зміщень GNSS-реперів (модельні дані, 2024–2025 рр.)**

ком випадкових помилок спостережень, а відображає реальний процес деформації земної поверхні або інженерної споруди. Такий підхід широко застосовується у високоточному геодезичному моніторингу, оскільки мінімізує ймовірність хибного виявлення деформацій.

Для додаткової перевірки статистичної достовірності отриманих результатів використовувався t-критерій Стьюдента при рівні значущості $\alpha = 0{,}05$. Застосування цього критерію дозволяє оцінити, чи є різниця між координатами, визначеними у двох послідовних циклах спостережень, статистично значущою. Якщо розраховане значення статистики tobs перевищує критичне значення tcrit, отримане для відповідної кількості ступенів свободи та рівня значущості 0,05, нульова гіпотеза про відсутність зміщення відхиляється, а зафіксоване переміщення вважається достовірним.

Комплексне використання критерію 3σ та t-критерію Стьюдента забезпечує високий рівень надійності інтерпретації результатів GNSS-моніторингу. Поєднання цих статистичних методів дозволяє не лише оцінити величину просторових переміщень, але й визначити ступінь їх достовірності, що є необхідною умовою для прогнозування розвитку деформаційних процесів, оцінювання стійкості техногенно порушених територій та прийняття обґрунтованих інженерних рішень щодо безпечної експлуатації або подальшого будівельного освоєння досліджуваних об'єктів [8, 9].

## *Результати дослідження та їх обговорення*

Оцінка точності GNSS-моніторингу деформацій проводиться за двома напрямами: внутрішня точність на основі нев'язок у мережі та зовнішня перевірка через порівняння з результатами геометричного нівелювання або наземного лазерного сканування. На рис. 4 представлено порівняння точності основних методів геодезичного моніторингу. GNSS-метод при статичних спостереженнях забезпечує горизонтальну точність ±1–3 мм та вертикальну ±3–8 мм, що є оптимальним балансом між точністю та

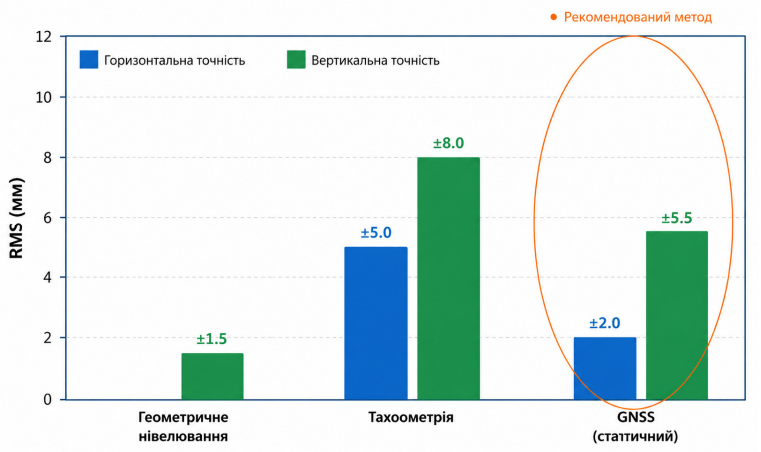


**Рис. 4. Порівняння точності методів геодезичного моніторингу (СКП, мм)**

**4. Показники точності визначення координат реперів мережі моніторингу**

| Репер | σN (мм) | σE (мм) | σU (мм) | σ3D (мм) |
|---|---|---|---|---|
| P1 (базовий) | 0,8 | 0,9 | 2,1 | 2,4 |
| P2 | 1,1 | 1,2 | 3,8 | 4,1 |
| P3 | 0,9 | 1,0 | 3,2 | 3,5 |
| P4 | 1,3 | 1,4 | 4,5 | 4,9 |
| P5 | 1,0 | 1,1 | 3,5 | 3,8 |

оперативністю спостережень для задач моніторингу деформацій порушених територій [8, 9, 10].

Досягнуті показники точності визначення координат реперів модельної мережі наведені в табл. 4.

Для підвищення точності застосовуються: прив'язка до мережі референцних станцій CORS України; прив'язка до пунктів GNSS-мережі IGS; метод «стека» для усереднення результатів багатоепохової обробки. Достовірність результатів підвищується завдяки структурованому збереженню телеметрії реперної станції разом із кожним вимірюванням.

Економічне обґрунтування системи є важливим аспектом для прийняття рішення щодо її впровадження. Вартість одного циклу традиційного геодезичного контролю (нівелювання + тахеометрія) для об'єкта площею 1–2 га становить 15 000–25 000 грн, тоді як система автономного GNSS-моніторингу після первинного інвестування (орієнтовно 80 000–120 000 грн на 6–8 реперів) забезпечує безперервний контроль практично без додаткових витрат. Таким чином, окупність системи досягається вже протягом 1–2 років експлуатації. Згідно з галузевою статистикою, витрати на ліквідацію аварійних ситуацій, спричинених непередбаченими деформаціями основ, у середньому у 5–10 разів перевищують вартість превентивного моніторингу.

## *Висновки і перспективи*

Проведене дослідження підтвердило високу ефективність використання технологій глобальних навігаційних супутникових систем для моніторингу деформацій техногенно порушених територій, призначених для подальшого будівельного освоєння. Запропонована методика, що поєднує статичні GNSS-спостереження, високоточну постобробку супутникових даних та статистичне оцінювання результатів, забезпечує надійне визначення просторових переміщень контрольних пунктів із міліметровою точністю. Результати оцінювання точності засвідчили, що достовірність GNSS-моніторингу доцільно визначати за двома взаємодоповнювальними напрямами: внутрішнім контролем, який ґрунтується на аналізі нев'язок, середньоквадратичних похибок координат і показників якості урівнювання мережі, та зовнішньою верифікацією шляхом порівняння результатів із незалежними геодезичними методами, зокрема високоточним геометричним нівелюванням і наземним лазерним скануванням. Такий підхід забезпечує комплексну оцінку достовірності визначених деформацій та

мінімізує ризик виникнення систематичних похибок.

Порівняльний аналіз сучасних методів геодезичного моніторингу показав, що статичний GNSS-метод забезпечує горизонтальну точність на рівні ±1–3 мм та вертикальну ±3–8 мм, що повністю відповідає вимогам до моніторингу повільних деформацій земної поверхні. На відміну від традиційних методів, GNSS-технології дозволяють одночасно визначати тривимірні координати великої кількості контрольних пунктів, виконувати безперервний автоматизований моніторинг і охоплювати значні території без необхідності забезпечення взаємної видимості між пунктами.

Встановлено, що інтеграція GNSS-спостережень із геометричним нівелюванням, наземним лазерним скануванням та сучасними геоінформаційними технологіями істотно підвищує достовірність оцінювання деформаційних процесів. Комплексне використання різних методів забезпечує взаємний контроль результатів, дозволяє отримувати просторово безперервну інформацію про розвиток деформацій і формує надійну інформаційну основу для прогнозування геодинамічних процесів.

Таким чином, запропонована методика GNSS-моніторингу може бути рекомендована для геодезичного забезпечення будівництва на техногенно порушених територіях, контролю стану інженерних споруд, рекультивованих відвалів, кар'єрів, хвостосховищ та інших потенційно небезпечних об'єктів. Практичне впровадження розробленого підходу сприятиме підвищенню рівня інженерної безпеки, своєчасному виявленню небезпечних деформацій і прийняттю обґрунтованих управлінських рішень щодо подальшої експлуатації та забудови територій. Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція мереж автономних GNSS-реперів із безперервними системами дистанційного моніторингу, геоінформаційними платформами та алгоритмами прогнозування на основі методів штучного інтелекту, що забезпечить оперативне виявлення критичних змін і підвищить ефективність управління ризиками під час будівництва та експлуатації інженерних об'єктів.

**Список використаної літератури**


1. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві. Київ : Мінрегіон України, 2010. 58 с.
2. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження і моніторингу будівельних конструкцій. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 47 с.
3. ДБН В.2.1-10:2018. Основи та фундаменти споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018. 64 с.
4. Тревого І. С., Шевченко Т. Г. GNSS в геодезії. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 196 с.
5. Хоменко П. А. Моніторинг деформацій земної поверхні методами супутникової геодезії. Харків : ХНУБА, 2019. 128 с.
6. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. Wien : Springer, 2008. 516 p.
7. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 840 p.
8. Blewitt G., Lavallée D. Effect of annual signals on geodetic velocity. Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107, No. B7. DOI: 10.1029/2001JB000570.
9. Teferle F. N., Bingley R. M., Williams S. D. P. et al. Crustal motions in Great Britain. Geophysical Journal International. 2009. Vol. 178, No. 1. P. 23–46. DOI: 10.1111/j.1365-

246X.2009.04185.x.
10. Vernant P., Reilinger R., McClusky S. et al. Geodetic constraints on deformation at active tectonic margins. Tectonophysics. 2014. Vol. 631. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.tecto.2014.05.017.
11. International GNSS Service (IGS). GNSS Data Formats and Standards. URL: https://igs.org/formats-and-standards/ (дата звернення: 10.03.2026).
12. Teunissen P.J.G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. Journal of Geodesy. 1995. Vol. 70. P. 65–82. DOI: 10.1007/BF00863419.

**References**

1. DBN V.1.3-2:2010. (2010). Heodezychni roboty u budivnytstvi [Geodetic Works in Construction]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. 58 p.
2. DSTU-N B V.1.2-18:2016. (2016). Nastanova shchodo obstezhennia i monitorynhu budivelnykh konstruktsii [Guidelines for Inspection and Monitoring of Building Structures]. Kyiv: UkrNDNC. 47 p.
3. DBN V.2.1-10:2018. (2018). Osnovy ta fundamenty sporud [Foundations of Buildings and Structures]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. 64 p.
4. Trevoho, I. S., & Shevchenko, T. H. (2012). GNSS v heodezii [GNSS in Geodesy]. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. 196 p.
5. Khomenko, P. A. (2019). Monitorynh deformatsii zemnoi poverkhni metodamy suputnykovoi heodezii [Monitoring of Ground Surface Deformations Using Satellite Geodesy Methods]. Kharkiv: Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. 128 p.
6. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). GNSS – Global Navigation Satellite Systems. Vienna: Springer. 516 p.
7. Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). GPS Satellite Surveying (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 840 p.
8. Blewitt, G., & Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. Journal of Geophysical Research, 107(B7). https://doi.org/10.1029/2001JB000570
9. Teferle, F. N., Bingley, R. M., Williams, S. D. P., et al. (2009). Crustal motions in Great Britain. Geophysical Journal International, 178(1), 23–46. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04185.x
10. Vernant, P., Reilinger, R., McClusky, S., et al. (2014). Geodetic constraints on deformation at active tectonic margins. Tectonophysics, 631, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.017
11. International GNSS Service (IGS). (2026). GNSS Data Formats and Standards. Available at: https://igs.org/formats-and-standards/ (accessed 10 March 2026).
12. Teunissen P.J.G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. Journal of Geodesy. 1995. Vol. 70. P. 65–82. DOI: 10.1007/BF00863419.

***Berezan Y. , Hlypovka Y.***

***GNSS MONITORING OF DEFORMATIONS IN DISTURBED TERRITORIES FOR CONSTRUCTION APPLICATIONS***

*LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 4'26: 252-266.*
*http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.04.16*

***Abstract.*** *This paper addresses the relevant scientific and practical problem of improving geodetic support for construction on technogenically disturbed territories through the implementation of modern Global Navigation Satellite System (GNSS) technologies. A considerable proportion*

*of areas affected by mining activities are characterized by the development of slow deformation processes that may adversely affect the stability of building foundations, engineering structures, utility networks, and infrastructure facilities. Consequently, there is a growing need for a high-precision monitoring system capable of providing timely detection of ground surface displacements and forecasting the development of hazardous geodynamic processes.*

*The objective of this study is to provide a scientific basis for and develop a comprehensive methodology for GNSS-based deformation monitoring of technogenically disturbed territories intended for engineering surveys, design, construction, and operation of civil and industrial facilities. The proposed methodology is based on the application of autonomous GNSS reference stations, high-precision static GNSS observations, advanced GNSS data processing software, and statistical methods for coordinate time-series analysis.*

*The study proposes the design of an autonomous GNSS reference station integrating a multi-frequency, multi-constellation GNSS receiver, a solar-powered autonomous energy supply system, a control unit, a wireless communication module, and a local data storage unit. The proposed technical solution enables long-term continuous operation of the monitoring network with minimal maintenance requirements. The originality of the developed design is supported by a patent application, demonstrating the practical significance of the proposed monitoring system.*

*Optimal parameters for organizing static GNSS observations are substantiated, including observation session duration, satellite signal sampling interval, observation frequency, satellite constellation geometry requirements, and quality assessment criteria. In addition, a GNSS data processing workflow based on Bernese GNSS Software, GAMIT/GLOBK, Trimble Business Center, and Leica Infinity has been developed, providing automated coordinate determination for monitoring benchmarks, generation of deformation time series, and statistical assessment of the reliability of the obtained results.*

***Keywords:*** *GNSS monitoring, deformation of engineering structures, geodetic monitoring, satellite measurements, geodetic control, measurement accuracy, automated data processing, economic efficiency of monitoring.*