
ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМЕЛЬ У КОНТЕКСТІ ТЕХНОГЕННИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА КЛІМАТИЧНИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ

А.В. ЧУГАЙ,

доктор технічних наук,

Email: avchugai@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8091-8430

М.Г. СЕРБОВ,

доктор економічних наук,

Email: serbovng@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0220-6745

Н.В. ДАНИЛОВА,

кандидат географічних наук,

Email: nataliadanilova0212@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4595-1208

Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова

Анотація. статті розглянуто питання геодезичного забезпечення моніторингу деформацій земної поверхні, спричинених техногенним тиском та кліматичними змінами, що є важливою умовою для запобігання деградації ґрунтів і сталого розвитку територій. Мета роботи полягає у комплексному дослідженні системи геодезичного забезпечення як фундаментальної основи для отримання просторових даних, необхідних для оцінювання та прогнозування динаміки стану земельних ресурсів. Об'єктом для практичної апробації запропонованих рішень слугували ерозійно-небезпечні сільськогосподарські угіддя Мізоцької територіальної громади Рівненської області. У роботі проаналізовано алгоритм здійснення геодезичного моніторингу, що охоплює підготовчі і польові роботи, камеральне опрацювання, ГІС-модельювання просторових змін та етап прийняття управлінських рішень. Акцентовано увагу на тому, що кожна стадія потребує інтеграції специфічних інструментальних методів і топографо-геодезичних процедур для високоточної фіксації просторових зрушень рельєфу та ґрунтового покриву у часі. Деталізовано принципи формування моніторингової основи. Зокрема, сформульовано базові критерії проектування геодезичних мереж: розбивка профільних ліній, надійна фіксація щонайменше двох опорних

реперів поза зоною ймовірних деформацій та оптимальне розміщення робочих станцій безпосередньо в межах ділянки ризику.

Доведено практичну цінність систематичних наземних геодезичних вимірювань для своєчасної ідентифікації ерозійних осередків та ґрунтових зрушень. Накопичений масив верифікованих просторових даних створює достовірне підґрунтя для розроблення ефективних меліоративних заходів і прийняття управлінських рішень у сфері охорони земель громади. Перспективи подальших наукових розвідок полягають в адаптації інструментарію деформаційного моніторингу до інших типів ландшафтів та специфічних режимів використання територій.

Ключові слова: *геодезичне забезпечення, моніторинг, землекористування, деформація земель, техногенне навантаження, кліматичні зміни, ГІС, GNSS, БПЛА.*

Актуальність

В останні десятиліття деформація земної поверхні перетворилася на значну загрозу для безпеки функціонування інженерної інфраструктури та просторового розвитку територій, оскільки створює ризики руйнування об'єктів і порушення умов ведення господарської діяльності. Це поширене небезпечне явище, яке може спричинити низку серйозних наслідків, зокрема: підвищення ризику затоплення прибережних територій, пошкодження будівель та інфраструктури, порушення гідрогеологічного режиму ґрунтових вод, утворення зсувів тощо. Прояви небезпечних процесів, пов'язаних із деформацією земної поверхні, систематично фіксуються як у світі, так і в Україні. З огляду на це, здійснення безперервного моніторингу деформаційних процесів є фундаментальною умовою для глибокого розуміння динаміки земної поверхні та управління відповідними ризиками з метою забезпечення безпечного використання територій та інфраструктури. Особливої актуальності ця проблема набуває в регіонах зі складними гідрогеологічними умовами та переважанням сільсько-

господарських угідь (наприклад, у зоні Лісостепу та Степу України), де водна ерозія та зміни рівня ґрунтових вод безпосередньо впливають на продуктивність земель. Для своєчасного виявлення й оцінки цих процесів, а також запобігання їм, виникає потреба у проведенні безперервного геодезичного моніторингу в зонах потенційного ризику..

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанням геодезичного забезпечення моніторингу та охорони земель присвячені праці багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Аналіз сучасних публікацій дозволяє виділити кілька ключових напрямів досліджень у цій сфері. Теоретико-методологічні засади геодезичного моніторингу розкривають праці [1, 2, 3], у яких визначають ґрунтовні підходи до фіксації деформацій земної поверхні. Зокрема, Д. Хайнус та співавтори [1] аналізують сучасні методи вищої геодезії та їхню прикладну цінність для визначення просторових зміщень. О. Доброходова та колеги [2] узагальнюють теоретичні аспекти деформаційного моніторингу як для природних, так і для антропогенних

процесів. Міжнародний досвід та еволюцію підходів до спостережень за деформаціями земель систематизовано в оглядовій праці А. Ng та ін. [3], що підкреслює глобальну актуальність проблеми. У науковій статті Н. Колеснік та М. Кожем'яко детально висвітлено значення геодезичних спостережень для розрахунку та аналізу деформацій земної поверхні у зоні впливу гірничих робіт [4].

Значний масив досліджень присвячено вивченню впливу техногенного навантаження та локальних геопроцесів на деформацію земель. Так, О. Намінат у своєму дисертаційному дослідженні [5] вирішує складну науково-практичну задачу геодезичного моніторингу лінійних об'єктів, які знаходяться в зонах безпосереднього впливу підземних гірничих робіт. Регіональний аспект небезпечних геопроцесів (зокрема, зсувів) аналізують Д. Булишева та співавтори [6] на прикладі прибережної смуги Чорноморського узбережжя для запобігання ризикам надзвичайних ситуацій. Урбанізованим територіям, які зазнають комплексного антропогенного тиску, присвячено монографію Р. Шевченка [7], у якій розглянуто інструментарій екологічного моніторингу на прикладі міста Києва.

Визначальною тенденцією сучасного етапу є перехід від традиційних геодезичних вимірювань до комплексного використання масивів просторових даних на базі ГІС-технологій та методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Так, О. Браславська [8] досліджує ефективність застосування ГІС-технологій та даних ДЗЗ для відстеження динаміки змін у землекористуванні на значних площах. Більш вузькоспеціалізований, але ви-

сокоточний інструмент – супутникову радарну інтерферометрію – розглядають Ү. Aimaiti та ін. [9], доводячи її ефективність для виявлення міліметрових деформацій земної поверхні.

Моніторинг в умовах військової агресії та постконфліктного відновлення став окремим, актуальним напрямом для української науки. Дослідження стану земель під впливом бойових дій Г. Домашенко та співавторів [10] обґрунтовує необхідність спеціалізованого геодезичного забезпечення для моніторингу змін землекористування в умовах воєнного стану та під час постконфліктного відновлення територій. Цю ж проблематику доповнюють М. Сербов, Н. Данілова та В. Пилип'юк [11], які пропонують методологічні засади застосування ДЗЗ безпосередньо у зонах бойових дій, де традиційні наземні геодезичні вимірювання є небезпечними або неможливими.

Незважаючи на значну кількість ґрунтовних праць, присвячених високоточним вимірюванням, ДЗЗ та геоінформаційному аналізу, більшість із них фокусує увагу на індустріальних об'єктах (гірничі відводи, міста), або на макрорегіональних змінах. Водночас питання інтеграції цих сучасних технологій безпосередньо в практику землевпорядкування сільськогосподарських угідь для локального моніторингу ерозійних процесів та деградації ґрунтів є недостатньо розкритим і потребує подальших досліджень.

Метою статті є дослідження системи геодезичного забезпечення як базової складової для збору просторових даних, оцінки та прогнозування деформацій земельних ресурсів в умовах техногенного та кліматичного впливу.

Наукова новизна дослідження полягає в удосконаленні системи геодезичного забезпечення моніторингу деформацій локального рівня, адаптованої до потреб еколого-економічної охорони сільськогосподарських земель. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на індустріальні та урбанізовані території, у дослідженні обґрунтовано комплексне застосування високоточних наземних геодезичних вимірювань як первинного інструменту для фіксації просторових зрушень ґрунту та оцінки стійкості протиерозійних гідротехнічних споруд в умовах мінливого кліматичного впливу.

Матеріали і методи дослідження

Інформаційною та матеріальною базою дослідження слугували праці вітчизняних і зарубіжних вчених у галузі землеустрою, геодезії та геоінформатики. У дослідженні використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів. За допомогою методу системного аналізу досліджено сучасний стан та структуру геодезичного забезпечення для фіксації деформаційних процесів. Порівняльний метод застосовано для оцінки ефективності інтеграції даних дистанційного зондування Землі з наземними вимірюваннями. Метод концептуального моделювання використано для розробки структурно-логічної схеми обробки просторових даних у середовищі відкритих ГІС для прогнозування розвитку ерозійних процесів в умовах кліматичних змін. Формування висновків та теоретичних узагальнень здійснено з використанням абстрактно-логічного підходу.

Результати дослідження та їх обговорення

Інтенсивне сільськогосподарське використання земель у поєднанні з кліматичними аномаліями (зміна структури опадів у холодний період, тривалі посухи, стихійні лиха) призводить до активізації екзогенних процесів: площинного змиву, яроутворення та просідання ґрунтів. Для своєчасного виявлення цих явищ необхідне проведення моніторингу деформацій земель. Моніторинг включає ряд етапів, що формують замкнений цикл геоекологічного контролю: інвентаризацію існуючого стану земель, інструментальну фіксацію деформаційних зсувів або зрушень, математичне моделювання їхнього подальшого розвитку та розробку проєктів землеустрою, що забезпечують еколого-економічну охорону сільськогосподарських ландшафтів (табл. 1).

Кожний етап вимагає геодезичне забезпечення, яке розглядається як комплекс спеціалізованих топографо-геодезичних робіт, інструментальних методів та сучасних технологій, спрямованих на систематичне спостереження, високоточне вимірювання та просторовий аналіз змін (зміщень) земної поверхні, ґрунтового покриву та інженерних споруд у часі [1]. В основу кожного етапу покладено виконання спеціалізованих топографо-геодезичних робіт.

Під час підготовчого етапу моніторингу деформацій земель топографо-геодезичні роботи спрямовані на створення моніторингової основи, а саме: проєктування, закладання та розвиток спеціальних опорних (вихідних) і деформаційних (робочих) геодезичних мереж у межах досліджуваних територій.

1. Етапи моніторингу деформацій земель

Етапи	Характеристика
Підготовчий етап	аналіз архівних картографічних і фондових матеріалів, даних попередніх ґрунтових обстежень та проектування мережі спостережень.
Збір просторових даних (польовий етап)	проведення високоточних геодезичних вимірювань (GNSS-знімання), аерофотознімання за допомогою БПЛА, мобільного лазерного сканування (LiDAR) та завантаження актуальних супутникових знімків.
Камеральна обробка та ГІС-аналіз	опрацювання даних у спеціалізованому програмному забезпеченні (наприклад, QGIS чи Digitals), побудова високоточних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та виявлення просторових відхилень шляхом накладання різночасових моделей.
Моделювання та прогнозування	просторовий аналіз динаміки деформацій, розрахунок обсягів втраченого або зміщеного ґрунту та побудова прогнозних 3D-моделей розвитку екзогенних процесів.
Прийняття рішень (заключний етап)	формування тематичних карт просторових змін та розробка обґрунтованих рекомендацій щодо впровадження протиерозійних і мелоративних заходів.

Моніторингова основа – це спеціально створена мережа закріплених на місцевості пунктів, які слугують «системою координат» або нерухомим базисом для всіх подальших вимірювань. Опорні пункти є надійною базою для всієї системи спостережень і мають зберігати свої просторові координати незмінними протягом тривалого часу. Деформаційні (робочі) пункти – це пункти (репери, марки), які встановлюють безпосередньо в зоні, де відбуваються процеси: на схилах, що розмиваються, у ярах або на ділянках просідання. Вони «рухаються» разом із землею. Вимірюючи різницю в їхніх координатах порівняно з минулим циклом, визначають швидкість і напрямок деформації. Проектування мережі спостережень здійснюється відносно державної геодезичної мережі (для визначення координат пунктів) та особливостей місцевості (однорідності геологічної будови товщі порід, рельєфу місцевості, технологічних зон, передбачуваних ділянок максимальних навантажень). Мережу будують у формі профільних ліній, на кожному кінці яких закладають, щонайменше два опорних пункти (репери), які розта-

шовують за межами зони ймовірних деформацій, а робочі – розміщують по периметру і безпосередньо в межах досліджуваної території [6].

Збір просторових даних (польовий етап) передбачає проведення періодичних (циклічних) вимірювань просторових координат за допомогою GNSS-технологій, електронних тахеометрів та високоточного нівелювання для фіксації навіть міліметрових зміщень. Інструментальні спостереження включають: нівелювання всіх реперів; вимір відстаней між реперами вздовж профільних ліній; зйомку тріщин, що утворились на поверхні; виміри деформацій об'єктів. Зазначимо, що деформація – це зміна координат у часі, тому геодезія проявляється у циклічності та точності. Достовірність результатів геодезичних вимірювань безпосередньо залежить від точності застосованих методів (табл. 2) [12].

Планові координати (X,Y) визначають за допомогою двочастотних GNSS-приймачів у статичному режимі для базових ліній та в режимі RTK для швидкого контролю робочих марок. Середньоквадратична похибка планових вимірювань не по-

2. Порівняльна характеристика точності інструментальних геодезичних методів при моніторингу деформацій земель

Метод / Прилад	Умови вимірювання	Очікувана точність
Нівелір високоточний	Нівелювання ліній	0,3–0,5 мм/км
Нівелір цифровий	Нівелювання ліній	0,3–1,0 мм/км
Нівелір середньої точності	Нівелювання ліній	1,0–3,0 мм/км
Електронний тахеометр	Лінійно-кутові виміри (до кількох км)	1–5 см
GNSS-приймач (RTK / DGPS)	Наявність мережевих поправок і гарного сигналу	0,5–3,0 см
GNSS-приймач (Автономно)	Поодинокі позиціонування без корекцій	3–10 м
Наземний лазерний сканер (TLS)	Створення високоточних 3D-моделей локальних ділянок	1–5 мм
Мобільне сканування / БПЛА (LiDAR)	Залежить від якості калібрування системи та дальності знімання	1–10 см

винна перевищувати 10–15 мм. Для високоточної фіксації вертикальних просідань застосовують геометричне нівелювання II класу цифровими нівелірами по інварних рейках, що забезпечує міліметрову точність.

Для підвищення достовірності та інтерпретаційної надійності результатів супутникових вимірів, наземних методів (тахеометрії та геометричного нівелювання) використовують аерофотозйомку з безпілотних літальних апаратів, що дозволяє уточнювати модель рельєфу та виявляти локальні зміни форми поверхні місцевості. БПЛА-знімання проходить за схемою: створення мережі наземних опорних точок, координати яких визначають GNSS-ровером; виконання польотного завдання з поздовжнім та поперечним перекриттям знімків не менше 75–80%; фотограмметричне опрацювання: побудова щільної хмари точок та генерування високоточної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з просторовою розрізненістю 2–5 см/піксель. Побудова високоточних та деталізованих цифрових моделей рельєфу й об'єктів місцевості відбувається за допомогою техноло-

гії лазерного сканування, або LiDAR (Light Detection and Ranging). Цей метод є ефективним для аналізу наслідків землетрусів, зсувів, селевих потоків тощо. Крім того, він дозволяє відстежувати навіть незначні деформації схилів, які можуть передувати ерозійним процесам [13].

Камеральну обробку та ГІС-аналіз результатів спостережень проводять безпосередньо після завершення кожної серії вимірювань і передбачають: перевірку польових журналів; обчислення висотних відміток усіх реперів спостережної станції; обчислення горизонтальних відстаней між реперами профільних ліній; визначення відстаней від опорного репера до кожного з реперів профільної лінії станції; складання відомостей за кожною профільною лінією (щодо вертикальних і горизонтальних зсувів реперів, а також горизонтальних деформацій – розтягу та стиску); створення графічних матеріалів. Позначки реперів після обробки кожної серії спостережень заносяться до відомостей вертикальних зрушень.

Зазначимо, що на етапі просторового аналізу, моделювання та про-

гнозування опрацьовані результати GNSS-спостережень спрямовані на отримання достовірної інформації щодо характеру та динаміки деформацій. Для забезпечення цього виконується перевірка повноти вихідних даних, аналіз стійкості супутникових рішень та виявлення аномальних значень координат. При цьому особлива увага приділяється виключенню впливу випадкових помилок, відбитих сигналів та короточасних перешкод. Відповідно застосовують процедури фільтрації та згладжування часових рядів координат. Після очищення даних кожного пункту формують тимчасові залежності вертикальних і горизонтальних зрушень. На основі отриманих часових рядів визначають накопичені деформації та середні швидкості переміщень. Аналіз динаміки дозволяє виявляти ділянки з прискоренням просідань або зрушень, що може свідчити про несприятливі зміни стану масиву [12].

Обчислення різниці координат реперів між нульовим (вихідним) та поточним циклами спостережень визначають за формулою.

$$\Delta X = X_i - X_0; \Delta Y = Y_i - Y_0, \quad (1)$$

де: ΔX , ΔY – величина різниці координат реперів, мм;

X_i , Y_i – координата репера поточного циклу, м;

X_0 , Y_0 – координата репера нульового (вихідного) циклу, м.

$$\Delta H = H_i - H_0, \quad (2)$$

де: ΔH – величина різниці висоти репера, мм;

H_i – висота репера поточного циклу, м;

H_0 – висота репера нульового (вихідного) циклу, м.

На основі цих даних будуються

вектори зміщень, що характеризують напрямок і швидкість руху ґрунтових мас.

На заключному етапі результати моніторингу перетворюють на картографічну форму для наочного подання інформації. Карти деформацій дозволяють візуально виділяти зони підвищеної активності та служать основою для прийняття інженерних рішень щодо коригування технологічних процесів та посилення контролю.

Практичні результати моніторингу деформацій земної поверхні представлено на прикладі ерозійно-небезпечних земель Мізоцької територіальної громади Рівненської області. Об'єкт спостереження – земельна ділянка, що належить до земель сільськогосподарського призначення. У 2020 році були побудовані протиерозійні гідротехнічні споруди (водозатримувальні вали) та проведено засипання ярів. Мета моніторингу – перевірка ділянок щодо наявності деформаційних процесів (просідань ґрунту) у місцях засипаних ярів та оцінка просторової стійкості збудованих гідротехнічних споруд. Для цього створено моніторингову основу, яка включала опорну (вихідну) і деформаційну (робочу) геодезичні мережі в межах досліджуваних територій (рис. 1). На кінцях профільної лінії, у верхній частині яру на безпечній відстані (близько 40 м від бровки яру та зони ймовірного осідання), було закладено два опорні реperi ($Rp1$ та $Rp2$). Їх розташували з таким розрахунком, щоб при подальшому зростанні яру вони не були зруйновані. Координати реперів визначені за результатами GNSS-спостережень. Загальна довжина лінії спостережень уздовж побудованих протиерозійних гідротехнічних споруд та засипаних ярів становить 1210 м. Під час зніман-

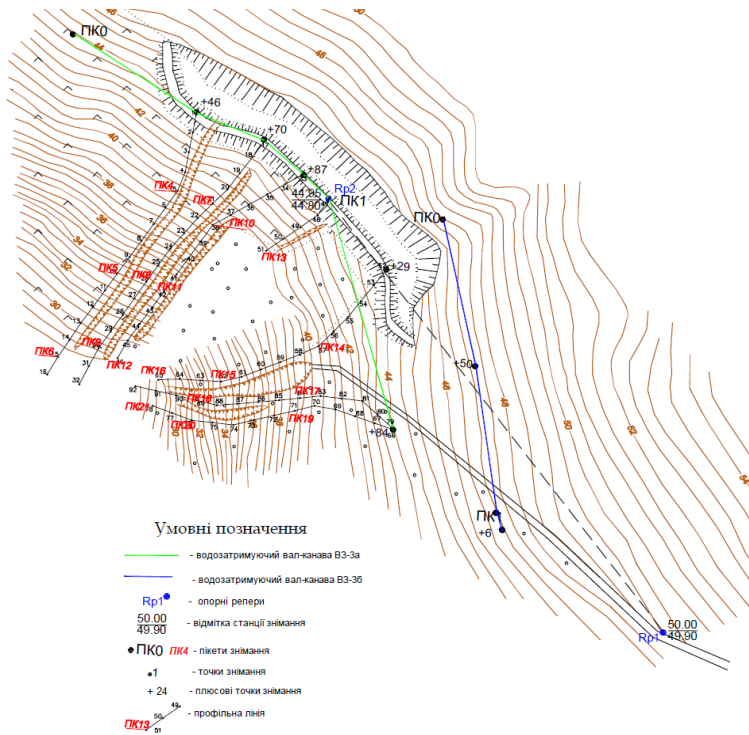


Рис. 1. Схема розбивки моніторингової основи ерозійно-небезпечних земель Мізоцької територіальної громади Рівненської області

ня було використано 21 пікет (закладені через кожні 50 м) та 95 точок знімання (розміщені через кожні 10 м). Вивчення проявів ерозійних процесів та росту ярів здійснювалося методом тахеометричного знімання за допомогою електронного тахеометра. Висотні позначки реперів профільних ліній визначалися нівелюванням III класу. Камеральне опрацювання результатів спостережень проводилося безпосередньо після закінчення кожної серії вимірювань. Обчислені висотні позначки заносили до відомостей вертикальних зміщень. Після контрольних перевірок польових вимірювань обчислювалися зміщення та деформації поверхні, а також будувалися відповідні графіки.

За різницею координат реперів (ΔX , ΔY , ΔZ) відносно їхнього вихідного положення визначено напрямок вектора зміщення у просторі, а за різницею горизонтальних прокладень ΔS між реперами – оцінити деформацію (стиснення або розтягування) ділянки земної поверхні. Протягом чотирьох років проводились систематичні інструментальні спостереження за досліджуваними ділянками, з метою виявлення динаміки зміщень у часі (табл. 3).

Спостереження перших 4-х циклів зафіксували рівномірне осідання земної поверхні. За результатами аналізу графіку вертикального зміщення за всіма реперами профільних ліній встановлено, що після досягнення

3. Періоди інструментальних спостережень на створеній опорній геодезичній мережі

Цикл	Період	Цикл	Період
1-й цикл	листопад 2022	5-й цикл	серпень 2024
2-й цикл	травень 2023	6-й цикл	березень 2025
3-й цикл	грудень 2023	7-й цикл	жовтень 2025
4-й цикл	лютий 2024		

максимальної величини осідання відбувається стабілізація деформаційних процесів (рис. 2). Це підтверджує успішну ліквідацію ярів та просторову стійкість збудованих протиерозійних гідротехнічних споруд.

Поряд із вертикальними зміщеннями, для комплексної оцінки безпеки зведених протиерозійних гідротехнічних споруд обов'язково досліджувалися планові зрушення (за осями X та Y). Урахування лише вертикальних деформацій є недостатнім, оскільки саме горизонтальний тиск ґрунтових мас несе загрозу зсуву та розриву тіла водозатримувальних валів. Однак аналіз результатів GNSS-спостережень та тахеометричного знімання засвідчив, що горизонтальні зміщення марок протягом усіх семи циклів не перевищували гранично допустимих похибок вимірювань

(у межах 10–15 мм). Це підтверджує відсутність небезпечних бокових зсувів ґрунту та доводить повну планову (горизонтальну) стійкість збудованих гідротехнічних споруд.

Висновки і пропозиції

Комплексне геодезичне забезпечення, що поєднує класичні інструментальні вимірювання (GNSS-технології, високоточне нівелювання) та сучасні методи просторового аналізу, є фундаментальною основою для моніторингу деформацій земної поверхні. Доведено, що інтеграція отриманих просторових даних у середовище ГІС дозволяє не лише з високою точністю фіксувати поточний стан ерозійно-небезпечних земель, але й здійснювати просторове моделювання та своєчасне виявлення негативних ек-

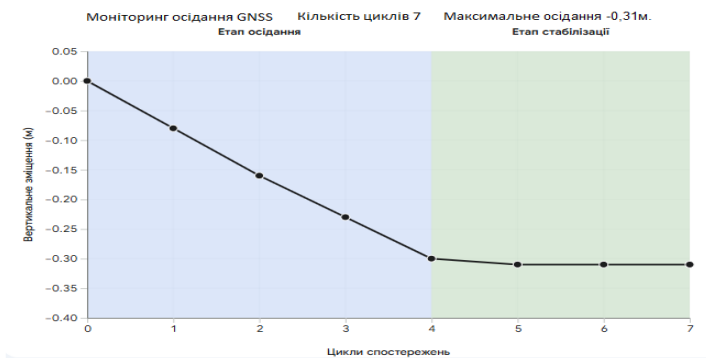


Рис. 2. Результати моніторингу вертикальних деформацій на ерозійно-небезпечних землях Мізоцької територіальної громади

зогенних процесів, зумовлених техногенним навантаженням і кліматичними змінами. Практична апробація запропонованої структури моніторингу на прикладі сільськогосподарських угідь Мізоцької територіальної громади підтвердила ефективність застосованих методів. Систематичні інструментальні спостереження, проведені протягом семи циклів, дозволили детально відстежити динаміку вертикальних зміщень у місцях ліквідованих ярів та зведених гідротехнічних споруд. Встановлено, що після періоду рівномірного осідання ґрунту (перші чотири цикли), з досягненням максимальної величини вертикального зміщення $-0,31$ м, відбувається повна стабілізація деформаційних процесів. Отримані результати інструментально підтверджують успішну консолідацію ґрунтів, просторову стійкість збудованих протиерозійних споруд та загальну ефективність проведених меліоративних заходів. З практичної точки зору, результати інструментального геодезичного моніторингу є базовим метричним шаром для інтеграції у системи підтримки прийняття рішень (DSS) у сфері землевпорядкування. Використання верифікованих геодезичних даних дозволяє алгоритмам DSS автоматизувати оцінку ризиків деградації ґрунтів, моделювати сценарії розвитку ерозійних процесів та розраховувати необхідні обсяги превентивних меліоративних робіт, що загалом підвищує ефективність просторового управління територіями громад.

Подальші дослідження необхідні для адаптації інструментарію геодезичного моніторингу до специфічних умов різних типів ландшафтів і режимів землекористування.

Список використаної літератури

1. Хайнус Д. Д., Могильний С. Г., Винограденко С. О., Капінос Н. О. Сучасні методи вищої геодезії та їх застосування в моніторингу деформацій земної поверхні. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. № 213. С. 101–115. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341836>.
2. Доброходова О. В., Андрусак В. М., Сущенко В. О. Деформаційний моніторинг землі та природних процесів. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 112. С. 355–361. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.44>.
3. Ng A. H.-M., Ge L., Chang H.-C., Du Z. Geodetic monitoring for land deformation. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 283. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15010283>.
4. Колеснік Н. А., Кожум'яко М. С. Геодезичний моніторинг деформацій земної поверхні та магістрального газопроводу в зоні впливу гірничих робіт. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2024. № 3. С. 123–133. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2024.03.010>.
5. Намінат О. С. Удосконалення методів геодезичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів в зонах впливу підземних гірничих робіт : дис. ... канд. техн. наук : 05.24.01. Львів, 2020. 197 с.
6. Булишева Д., Леонідова І., Малащук О., Варфоломеева О., Панасюк О. Забезпечення геодезичного моніторингу зсувів для запобігання ризикам надзвичайних ситуацій. *Архітектура та будівництво*. 2022. № 23. С. 138–147. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2022.23.138>.
7. Шевченко Р. Ю. Інструментарій моніторингу довкілля міста Києва : монографія. Київ, 2020. 324 с.
8. Браславська О. В. ГІС-технології та дистанційне зондування у моніторингу змін землекористування. Містобудування та територіальне планування.

2025. № 89. С. 472–487. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.472-487>.
9. Aimaity Y., Yamazaki F., Liu W., Kasimu A. Monitoring of land-surface deformation in the Karamay oilfield, Xinjiang, China, using SAR interferometry. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. P. 772. DOI: <https://doi.org/10.3390/app7080772>.
10. Домашенко Г. Т., Молнар С. С., Прокопенко Н. І. Геодезичне забезпечення процесів моніторингу змін у структурі землекористування України в період збройної агресії росії та постконфліктного відновлення. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2025. № 2. С. 20–32. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.02.02>.
11. Сербов М. Г., Данілова Н. В., Пилип'юк В. В. Застосування інтерферометрії дистанційного зондування для моніторингу деформацій земель у зонах бойових дій: методологічні засади та прикладні аспекти. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2025. Вип. 117 (2). С. 266–278. DOI: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2025-117.2-266-278>.
12. Панасюк А. В., Шлапак В. О., Тарнавський Д. О., Шапар Я. Р. Інтеграція GNSS-технологій у систему геодезичного моніторингу та управління гірничим транспортом. *Технічна інженерія*. 2025. № 2 (96). С. 305–312. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-305-312](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-305-312).
13. Świąkała P., Gruszczyński W., Stoch T., Puniach E., Mrocheń D., Matwij W. UAV applications for determination of land deformations caused by underground mining. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. P. 1733. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12111733>.
- formatsii zemnoi poverkhni [Modern methods of higher geodesy and their application in monitoring land surface deformation]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*, 213, 101–115. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341836>
2. Dobrokhodova, O. V., Andrusiak, V. M., & Sushchenko, V. O. (2025). Deformatsiinyi monitorynh zemli ta pryrodnykh protsesiv [Deformation monitoring of land and natural processes]. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 112, 355–361. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.44>
3. Ng, A. H.-M., Ge, L., Chang, H.-C., & Du, Z. (2023). Geodetic monitoring for land deformation. *Remote Sensing*, 15, 283. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15010283>
4. Kolesnik, N. A., Kozhumiako, M. S. (2024). Heodezychnyi monitorynh deformatsii zemnoi poverkhni ta mahistralnoho hazoprovodu v zoni vplyvu hirnychykh robit [Geodetic monitoring of land surface deformation and main gas pipeline in mining impact zones]. *Zemleustrii, kadastr i monitorynh zemel*, 3, 123–133. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2024.03.010>
5. Naminat, O. S. (2020). Udoskonalennia metodiv heodezychnoho zabezpechennia monitorynhu liniinykh ob'ektiv v zonakh vplyvu pidzemnykh hirnychykh robit [Improvement of geodetic support methods for monitoring linear objects in underground mining impact zones] (PhD dissertation). Lviv.
6. Bulysheva, D., Leonidova, I., Malashchuk, O., Varfolomeieva, O., & Panasiuk, O. (2022). Zabezpechennia heodezychnoho monitorynhu zsuviv dlia zapobihannia ryzykam nadzvychainykh sytuatsii [Ensuring geodetic monitoring of landslides to prevent emergency risks]. *Arkhitektura ta budivnytstvo*, 23, 138–147. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2022.23.138>

References

1. Khainus, D. D., Mohylnyi, S. H., Vynohradenko, S. O., & Kapinos, N. O. (2025). Suchasni metody vyshchoi heodezii ta yikh zastosuvannia v monitorynhu de-

7. Shevchenko, R. Yu. (2020). Instrumentarii monitorynhu dovkillia mista Kyieva [Environmental monitoring tools of Kyiv city]. Kyiv. 324.
8. Braslavska, O. V. (2025). HIS-tekhnohii ta dystantsiine zonduvannia u monitorynhu zmin zemlekorystuvannia [GIS and remote sensing in land use change monitoring]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 89, 472–487. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.472-487>
9. Aimaiti, Y., Yamazaki, F., Liu, W., & Kasimu, A. (2017). Monitoring of land-surface deformation in the Karamay oilfield, Xinjiang, China, using SAR interferometry. *Applied Sciences*, 7, 772. DOI: <https://doi.org/10.3390/app7080772>
10. Domashchenko, H. T., Molnar, S. S., & Prokopenko, N. I. (2025). Heodezychne zabezpechennia protsesiv monitorynhu zmin u strukturi zemlekorystuvannia Ukrainy v period zbroinoi ahresii rosii ta postkonfliktного vidnovlennia [Geodetic support for monitoring land use changes during armed aggression and post-conflict recovery]. *Zemleustrii, kadastr i monitorynh zemel*, 2, 20–32. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.02.02>
11. Serbov, M. H., Danilova, N. V., & Pylypiuk, V. V. (2025). Zastosuvannia interferometrii dystantsiinoho zonduvannia dlia monitorynhu deformatsii zemel u zonakh boiovykh dii: metodolohichni zasady ta prykladni aspekty [Application of remote sensing interferometry for monitoring land deformation in war zones]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, 117(2), 266–278. DOI: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2025-117.2-266-278>
12. Panasiuk, A. V., Shlapak, V. O., Tarnavskiy, D. O., & Shapar, Ya. R. (2025). Intehratsiia GNSS-tekhnohii u systemu heodezychnoho monitorynhu ta upravlinnia hirnychym transportom [Integration of GNSS technologies into geodetic monitoring systems]. *Tekhnichna inzheneriia*, 2(96), 305–312. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-305-312](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-305-312)
13. Ćwiąkała, P., Gruszczynski, W., Stoch, T., Puniach, E., Mrocheń, D., & Matwij, W. (2020). UAV applications for determination of land deformations caused by underground mining. *Remote Sensing*, 12, 1733. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12111733>

Chuhai A., Serbov M., Danilova N.

GEODETIC SUPPORT FOR MONITORING CHANGES IN LAND DEFORMATION UNDER ANTHROPOGENIC LOADS AND CLIMATE CHANGE

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 2'26: 100-112.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.02.07>

Abstract. *The article addresses the issue of geodetic support for monitoring land surface deformations caused by anthropogenic pressure and climate change, which is an important prerequisite for preventing soil degradation and ensuring sustainable territorial development. The aim of the study is a comprehensive investigation of the geodetic support system as a fundamental basis for obtaining spatial data necessary for assessing and forecasting the dynamics of land resource conditions. Erosion-prone agricultural lands of the Mizoch territorial community in Rivne region were selected as the object for practical testing of the proposed solutions. The study analyzes the algorithm of geodetic monitoring, which includes preparatory and field work, data processing, GIS-based modeling of spatial changes, and the stage of managerial decision-making. Particular attention is paid to the fact that each stage requires the integration of specific instrumental methods and topographic-geodetic procedures to ensure high-precision recording of spatial shifts in*

terrain and soil cover over time. The principles of forming a monitoring framework are described in detail. In particular, the basic criteria for designing geodetic networks are formulated, including the layout of profile lines, reliable fixation of at least two reference benchmarks outside the zone of potential deformations, and the optimal placement of working stations directly within the risk area. The practical value of systematic ground-based geodetic measurements for the timely identification of erosion centers and soil displacements is demonstrated. The accumulated set of verified spatial data provides a reliable basis for the development of effective land reclamation measures and for making informed management decisions in the field of land protection within the community. Prospects for further research include the adaptation of deformation monitoring tools to other types of landscapes and specific land-use regimes.

Keywords: *geodetic support, monitoring, land use, land deformation, technogenic load, climate change, GIS, GNSS, UAV.*
