
ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОННИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ У СИСТЕМАХ ПРОСТОРОВОГО УПРАВЛІННЯ ЯК ОСНОВА ВПРОВАДЖЕННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

І.О. УДОВЕНКО,

кандидат економічних наук, доцент,

E-mail: irinaudovenko8@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5971-8365

Уманський національний університет

Н.О. АРСЕНЬЄВА,

кандидат технічних наук, доцент,

E-mail: nataliarsen73@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6178-2558

Харківській національний автомобільно-дорожній університет

М.В. ШЕМЯКІН,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,

E-mail: misha.uman@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3621-1446

Уманський національний університет

Анотація. Стаття присвячена формуванню прикладних засад інтелектуалізації електронних геодезичних приладів через їхню інтеграцію з технологіями штучного інтелекту (ШІ). Дослідження присвячено переходу від традиційних вимірювальних приладів до адаптивних геодезичних систем. Такі комплекси зберігають метрологічну стабільність у мінливому середовищі. Методологія базується на техніко-аналітичному підході та структурному моделюванні інтелектуальних пристроїв. Проведено порівняльну оцінку функціональних режимів роботи. Виконано аналіз часових рядів геодезичних спостережень. Узагальнено практики застосування штучного інтелекту в геоінформаційних системах. Інформаційну основу склали технічні параметри тахеометрів і GNSS-приймачів. Використано характеристики лазерних сканерів та сенсорних платформ моніторингу. Застосовано дані цифрових систем управління міською інфраструктурою. Результати підтверджують ефективність алгоритмів комп'ютерного зору. Встановлено, що інтелектуальні геодезичні комплекси формують новий підхід до організації просторового контролю інфраструктури та територій.

Системи працюють не лише в режимі фіксації координат, а й у форматі безперервного аналізу стану об'єкта. Інтегровані алгоритми машинного навчання оцінюють динаміку зміщень, стабільність сигналу, рівень вібраційних навантажень та характер змін просторових параметрів у реальному часі. Особливу увагу приділено поєднанню тахеометрії, GNSS, LiDAR, фотограмметрії та безпілотних платформ у межах єдиного цифрового середовища. Особливо підтверджено ефективність інтелектуальних геодезичних сенсорів у системах моніторингу мостів, дамб, тунелів, транспортних вузлів і висотних споруд. Практична цінність полягає у розробці концепції геодезичних комплексів нового покоління. Нові прилади поєднують точні вимірювання з прогнозною аналітикою. Програмне забезпечення автоматично підтримує прийняття управлінських рішень. Наукова новизна визначається комплексним підходом до інтеграції штучного інтелекту. Поєднано інструментальні засоби з аналітичними моделями. Враховано інфраструктурні аспекти впровадження технологій у геодезичну практику.

Ключові слова: штучний інтелект, геодезичні прилади, просторове управління, лазерне сканування, моніторинг інфраструктури, цифрові двійники.

Вступ

Просторові дані які забезпечують муніципальні та інфраструктурні процеси планування, змінюють вимоги до геодезичного обладнання. Вимірювальний прилад уже не сприймається як окремий технічний засіб фіксації координат. Від нього очікують стабільної роботи в динамічному середовищі, швидкого аналізу результатів, автоматичного контролю точності та здатності взаємодіяти з цифровими платформами управління. Особливо це помітно там, де рішення залежать від часу реагування. Це сфери будівництва, транспорту, моніторинг споруд і міської інфраструктури. Звичайні алгоритми обробки вже не завжди справляються з великими потоками вимірювань і складними польовими умовами.

Наявні електронні тахеометри, GNSS-приймачі, лазерні сканери та суміжні комплекси здебільшого орієнтовані на виконання вимірювань за наперед заданими режимами роботи.

Але проблема полягає в іншому. Польове середовище змінюється швидше, ніж користувач встигає коригувати налаштування вручну. Унаслідок цього виникають похибки наведення, сигнальні завади, втрати часу на повторні цикли, а також затримки під час камеральної перевірки. Ці факти вказують на потребу інтеграції ШІ рішень з інтелектуалізованими геодезичними приладами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У дослідженні Кухаря М. А. [2] показано, що цифрове поєднання кількох джерел вимірювань підвищує оперативність оновлення територіальної інформації. Водночас поза увагою залишилися аспекти адаптації таких рішень безпосередньо до польових приладів. Дорожко Є. В. та Удовенко І. О. [1] простежили еволюцію електронних геодезичних систем від стандартної автоматизації до інтелектуального управління процесами

спостереження. Вони наголосили на зростанні ролі алгоритмічного контролю якості. Однак питання технічної реалізації автономних функцій у серійному обладнанні залишається розкритим не повністю. Нестеренко С. Г. зі співавторами [3] систематизували сучасні підходи до геодезичного моніторингу споруд і територій. Важливість регулярних спостережень для безпеки об'єктів не викликає сумнівів, проте прогнозування ризиків на основі часових рядів вимірювань досі викликає дискусії.

Узагальнюючий огляд Хамзіча А. [5] засвідчив, що автоматизоване розпізнавання і класифікація даних за допомогою ШІ суттєво розширюють можливості геодезії та геоінформатики. Але недостатньо опрацьовано, як інтегрувати такі моделі безпосередньо в геодезичні роботи. П'єрдікка Р. і Паоланті М. [13] проаналізували підходи GeoAI до інтерпретації складних геоматичних даних. Нейромережі демонструють високу результативність у роботі з неоднорідними масивами спостережень. Разом із тим відкритими лишаються питання енергетичної та обчислювальної оптимізації таких моделей.

Май Г., Се І., Цзя С. та ін. [8] запропонували бачення наступного покоління геопросторового штучного інтелекту з переходом до самонавчальних аналітичних платформ. Однак практична сумісність цих рішень із наявним геодезичним обладнанням потребує додаткового опрацювання. Сої Б., Каселімі М., Асгарімехр М. та їхні колеги [15] визначили роль ШІ в сучасній геодезії на рівні міжнародних ініціатив, наголосивши на перспективності глобальних сервісів обробки даних. Але питання локального використання таких технологій в інф-

раструктурному моніторингу лишаються недостатньо деталізованими.

Чжан Г., Чень Х. та Ян Х. [16] навели результати застосування роботизованих технологій для великомасштабного геодезичного збору даних. Автономні платформи показують високу ефективність, проте комплексна взаємодія робототехніки та інтелектуальних геодезичних приладів ще не завершена. Усе це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення подальшого дослідження стосовно впровадження ШІ в роботу електронних геодезичних приладів в просторовому управлінні.

Мета статті – обґрунтування прикладних засад поєднання технологій ШІ з роботою електронних геодезичних приладів для підвищення точності просторових вимірювань і автоматизації обробки геодезичних даних.

Матеріали і методи дослідження

У процесі роботи автори спиралися на технічні характеристики сучасних електронних тахеометрів, GNSS-приймачів, лазерних сканерів та мобільних геодезичних платформ. Крім того, до аналізу залучено аналітичні дані про функціонування цифрових систем просторового управління. Для дослідження були використані масиви координатних спостережень, часові ряди деформаційних вимірювань, параметри точності позиціонування, показники стабільності сигналу, а також результати сенсорного моніторингу інфраструктурних об'єктів. Методичну основу дослідження склали кілька підходів. Передусім це порівняльний аналіз технічних рішень, структурне моделювання інтелекту-

альних функцій приладів та сценарне оцінювання режимів експлуатації. Окрему роль відіграє системний підхід до інтеграції геодезичних даних у цифрові середовища управління. Наразті, ми звернулися до аналітичного узагальнення практик використання ШІ. Мова йде про автоматичне розпізнавання об'єктів, самодіагностику обладнання та прогнозування просторових змін.

Результати дослідження та їх обговорення

Геодезичні роботи завжди залежали від нестійких факторів забезпечення. Перший виробничий контур модернізації пов'язаний із системами комп'ютерного бачення. Інтелектуальний тахеометр уже не шукає ціль лише за контрастною плямою чи відбитим променем. Він аналізує геометрію сцени, контур призми, характер руху віхи, кутові зміни положення, навіть ймовірність тимчасового перекриття цілі транспортом або персоналом. Це дає стабільне автосупроводження там, де класичні режими втрачали наведення. Другий контур модернізації пов'язаний із самокалібруванням та прогнозуванням похибок. Класичний прилад працює за фіксованими заводськими параметрами, які з часом змінюються через знос, температурні деформації, удари при транспортуванні. Інтелектуальна система формує власну поведінкову модель і відстежує малі відхилення ще до того, як вони переходять у метрологічну проблему [10, с. 168]. Для оцінювання динамічного дрейфу параметрів сформуємо функцію(1).

Коли індекс перевищить поріг стабільності, прилад запустить сервіс-

$$D_k = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (p_{j,k} - \hat{p}_j)^2} + \eta \left| \frac{dp}{dt} \right| + \rho T_v. \quad (1)$$

де:

D_k – індекс технічного дрейфу на момент k ;

$p_{j,k}$ – поточний параметр j -го вузла;

\hat{p}_j – еталонне значення;

m – кількість контрольованих параметрів;

$\left| \frac{dp}{dt} \right|$ – швидкість зміни параметра;

T_v – вібраційне навантаження;

ний сценарій. Після цього повторний цикл перевірки блокує високоточний режим. Йдеться не про красиве меню, а про систему контекстної взаємодії. Вона розуміє, що оператор виконує винесення осей, спостереження деформацій чи виконавче знімання, після чого перебудовує сценарій дій, контрольні повідомлення та структуру введення даних. До речі, саме тут зменшується кількість людських пропусків [9, с. 200]. Щоб оцінити прикладну результативність модернізації, доцільно зіставити зміну технічних показників робіт після інтеграції ШІ (табл. 1).

Перший прикладний напрям пов'язаний з інтелектуальною класифікацією хмар точок LiDAR і лазерного сканування. Після польового проходу система отримує мільйони просторових точок з різною щільністю, відбивною здатністю та шумовими домішками. Нейромережевий модуль не лише групує точки за класами, а й оцінює форму об'єкта, вертикальний профіль, регулярність контурів, матеріальну структуру поверхні [6, с. 32]. Це дає змогу відокремити будівлі від дерев, дрібні опори від випадкового шуму, покриття дороги від відкритого ґрунту (рис. 1).

Для оцінювання якості автоматич-

1. Зміна експлуатаційних параметрів геодезичних робіт після впровадження інтелектуальних модулів [3, 16]

№ з/п	Вид геодезичних робіт	Критичний параметр до модернізації	Інтелектуальний механізм корекції	Стан параметра після модернізації	Побічний виробничий ефект
1	Винесення будівельних осей	Нестійке наведення на вісь	Автотрекінг призми	Висока повторюваність позиціонування	Менше повторних перевірок
2	GNSS-знімання в місті	Багатопроменевість сигналу	ML-фільтрація multipath	Зменшення координатного шуму	Коротший час стояння
3	Виконавче знімання фасадів	Втрата дрібних деталей	Інтелектуальний фокус та сегментація	Чіткі контури об'єкта	Менше ручного редагування
4	Моніторинг споруд	Повільне виявлення тренду зміщення	Онлайн-аналіз часових рядів	Раннє виявлення деформацій	Профілактичні дії
5	Геодезичні мережі	Прихований дрейф калібрування	Самодіагностика вузлів	Стабільність точності	Довший сервісний цикл
6	Кар'єрні роботи	Пилове середовище та вібрації	Адаптація режимів вимірювання	Стійкий вимірвальний процес	Менше простоїв
7	Кадастрові роботи	Операторські пропуски реквізитів	Контекстні підказки	Повнота журналів і агрибутів	Швидше оформлення

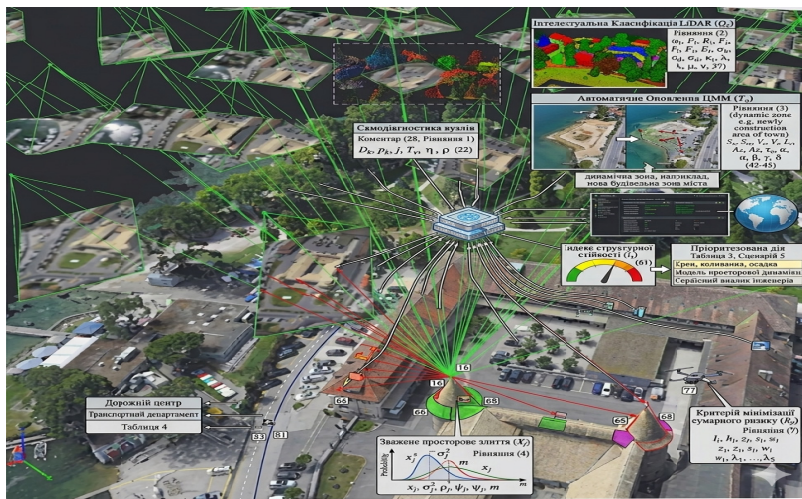


Рис. 1. Інтегрована модель багатопозиційного аерофотознімання території з БПЛА, предиктивним аналізом деформацій та інтелектуальною класифікацією LiDAR (побудовано авторами в середовищі SolidWorks)

ної класифікації доцільно використувати інтегральну модель виду:

$$Q_c = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \left(\frac{P_i R_i F_i}{1 + E_i} \right)}{1 + \lambda \sigma_h + \mu \sigma_d + \nu \kappa_i} \quad (2)$$

де:

Q_c – загальна якість класифікації;

ω_i – вага класу об’єкта;

P_i – точність віднесення до класу;

R_i – повнота виявлення;

F_i – геометрична узгодженість форми;

E_i – частка помилкових спрацювань;

σ_h – дисперсія висот;

σ_d – дисперсія щільності точок;

κ_i – часовий шум даних;

λ, μ, ν – коефіцієнти стабілізації.

У разі зниження показника, система переводить фрагмент у режим ручної експертизи або повторного навчання моделі. Другий напрям стосується автоматичного оновлення топографічних планів і цифрових моделей місцевості. Тут ШІ аналізує не лише нові вимірювання, а різницю між кількома часовими станами території. Якщо з’явився новий контур забудови, змінився ухил майданчика, демонтовано мережевий вузол чи виникла виїмка ґрунту, система фіксує подію та формує пакет змін [7]:

$$T_u = \frac{\alpha S_n + \beta S_m + \gamma V_e + \delta L_r}{A_z \cdot (1 + \tau_a)} \quad (3)$$

де:

T_u – індекс оновлення території;

S_n – площа нових об’єктів;

S_m – площа модифікованих контурів;

V_e – обсяг земляних змін;

L_r – довжина реконструйованих лінійних елементів;

A_z – площа зони контролю;

τ_a – коефіцієнт архівного старіння;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вагові коефіцієнти.

Чим більшим є значення, тим частіше ця зона повинна проходити повторне сканування. Такий підхід розподіляє ресурси раціонально. Для практичного управління доцільно зіставити параметри оновлення за типами територій (табл. 2).

Третій напрям стосується побудови єдиної координатної бази з тахеометрії, GNSS, фотограмметрії та БПЛА. Проблема полягає в тому, що кожне джерело має власну похибкову структуру. Якщо поєднання виконано грубо, система лише накопичує суперечності [11, с. 102]. Для зваженого просторового злиття даних запроваджується наступний показник:

$$X_f = \frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{x_j}{\sigma_j^2} \cdot \rho_j \cdot \psi_j \right)}{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{\sigma_j^2} \cdot \rho_j \cdot \psi_j \right)} \quad (4)$$

де:

X_f – зведене координатне значення;

x_j – координата з j -го джерела;

σ_j^2 – дисперсія джерела;

ρ_j – коефіцієнт надійності;

ψ_j – часовий коефіцієнт актуальності;

m – кількість джерел.

Традиційний інженерний контроль мав циклічний характер. Об’єкт оглядали за графіком, виконували локальні вимірювання, склали звіт і поверталися до нього через певний час [1, с. 122]. Інтелектуальна геодезична система працює інакше. На споруді

2. Параметри автоматичного оновлення цифрових планів територій [4, 13]

№ з/п	Тип території	Основне джерело даних	Тип змін, що домінує	Камеральне навантаження	Пріоритет повторного контролю
1	Центральна міська зона	БПЛА + GNSS	Реконструкція забудови	Високе	Високий
2	Житловий масив	Ортофото	Добудови та малі споруди	Середнє	Середній
3	Промисловий кластер	LiDAR	Нові майданчики та технічні зони	Високе	Високий
4	Передмістя	Супутникові знімки	Розширення меж використання	Середнє	Середній
5	Логістичний вузол	Мобільне сканування	Транспортні зміни	Високе	Високий
6	Рекреаційна зона	Супутник + БПЛА	Зміна покриття території	Низьке	Низький

встановлюються GNSS-модулі, роботизовані тахеометри, інклінометри, лазерні сканери, акселерометри, температурні датчики, камери технічного бачення. Дані надходять у єдиний аналітичний контур, де алгоритми ШП виявляють відхилення, аналізують тренди та ранжують ризики [12, с. 166]. Це, власне, змінює сам принцип управління, від реактивного до попереджувального. Для інтегральної оцінки технічної стійкості впроваджуємо багатofакторний індекс:

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \left(\frac{L_i^{cr} - L_i}{\sigma_i + \varepsilon} \right) \cdot \rho_i}{1 + \alpha t_e + \beta v_d + \gamma c_f + \delta m_r} \quad (5)$$

де:

I_s – індекс структурної стійкості;

L_i^{cr} – гранично допустиме значення контрольного параметра;

L_i – поточне значення параметра;

σ_i – дисперсія спостережень;

ρ_i – коефіцієнт достовірності сенсора;

t_e – строк експлуатації споруди;

v_d – динамічне навантаження;

c_f – коефіцієнт втоми матеріалу;

m_r – ремонтна затримка;

$\omega_i, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вагові коефіцієнти.

Якщо значення індексу знижується до порогової межі, система автоматично формує сигнал тривоги, режим обмеження навантаження або план позачергової діагностики. Першочергово такі рішення впроваджуються на об'єктах, де наслідки відмови мають масштабний характер. Визначаємо саме мостові переходи, транспортні естакади, греблі, тунельні комплекси, резервуарні споруди, високі будівлі та великі підпірні конструкції [14, с. 332]. Для них потрібен безперервний контроль, а не точкове спостереження (рис. 2).

Програмні модулі автоматично розпізнають віхи та призми у польових умовах. Системи ідентифікують контрольні марки та просторові орієнтири без ручного налаштування. Цей підхід скорочує час на наведення приладів. Кількість повторних спостережень значно зменшується. Вбудовані діагностичні інструменти фіксують температурний дрейф на ранніх етапах. Алгоритми виявляють вібраційні впливи та нестабільність живлення.



Рис. 2. Інтелектуальна система моніторингу та прогнозування деформацій мостової споруди на основі ТІМ (Технології Інформаційного Моделювання) та ШІ (побудовано авторами в середовищі SolidWorks)

3. Комплексні пропозиції щодо впровадження інтелектуальних геодезичних систем на об'єктах інфраструктури (розроблено авторами)

№ з/п	Тип об'єкта	Сенсорна конфігурація	Контрольовані параметри	Аналітичний модуль ШІ	Автоматична дія системи	Очікуваний експлуатаційний результат
1	Автомобільний міст	GNSS, тахеометр, акселерометр	Прогин, вібрація, температурний шов	Прогноз деформаційного тренду	Обмеження руху за смугами	Зниження аварійного ризику
2	Гребля	GNSS, інклінометр, п'єзометр	Зсув тіла, фільтрація, нахил	Модель стійкості масиву	Попередження диспетчера	Підвищення гідробезпеки
3	Тунель	Лазерний сканер, тахеометр	Осідання, зближення контурів	Геометричний контроль профілю	План позачергового огляду	Стабільність експлуатації
4	Шляхопровід	GNSS, камера, датчики тріщин	Зміщення опор, дефекти плити	Розпізнавання дефектів	Тимчасове обмеження маси	Зменшення перевантажень
5	Висотна споруда	GNSS, інклінометр, IMU	Крен, коливання, осадка	Модель просторової динаміки	Сервісний виклик інженерів	Контроль стійкості будівлі
6	Підземний колектор	Лінійні сенсори, сканер	Просідання, зсув секцій	Детектор аномалій	Вийзд аварійної бригади	Зменшення проривів
7	Кар'єрний борт	БПЛА, GNSS, LiDAR	Розкриття тріщин, зсуви	Геомеханічний прогноз	Закриття небезпечної зони	Захист персоналу

Система контролює відхилення калібрування в реальному часі. Це запобігає переходу похибок у критичний стан. Інтеграція тахеометрії з GNSS та LiDAR покращує точність даних.

Використання фотограмметрії та безпілотних платформ прискорює оновлення топографічних планів. Цифрові моделі місцевості та кадастрові бази формуються оперативніше.

Геодезичні сенсори ефективно працюють у мережах безперервного контролю. Їх застосовують для моніторингу мостів і дамб. Системи відстежують стан тунелів та висотних споруд. Щоб сформувавши технічну структуру застосування, доцільно зіставити пропозиції для різних типів об'єктів інфраструктури (табл. 3).

Прикладний контур стосується прогнозування просідань, кренів і зміщень за часовими рядами спостережень. Просте порівняння двох дат уже недостатнє. Якщо швидкість зміни зростає, навіть мале абсолютне зміщення може бути критичним [5, с. 138]. Для прогнозування поведінки споруди доцільно використати комбіновану часову модель:

$$D_{t+k} = a_0 + \sum_{j=1}^p a_j D_{t-j} + b_1 \dot{D}_t + b_2 \ddot{D}_t + c_1 T_t + c_2 Q_t + \xi_t. \quad (6)$$

де:

D_{t+k} – прогнозоване зміщення у момент $t+k$;

D_{t-j} – попередні спостереження;

\dot{D}_t – швидкість зміни;

\ddot{D}_t – прискорення процесу;

T_t – температурний фактор;

Q_t – транспортне або експлуатаційне навантаження;

ξ_t – випадкова складова;

a_p, b_1, b_2, c_1, c_2 – параметри моделі.

Якщо модель фіксує прискорення негативного тренду, система переводить об'єкт у режим посиленого контролю. Для вибору безпечної траєкторії роботизованого комплексу формується критерій мінімізації сумарного ризику:

$$R_p = \min \sum_{i=1}^m (\lambda_1 l_i + \lambda_2 h_i + \lambda_3 z_i + \lambda_4 s_i + \lambda_5 w_i). \quad (7)$$

де:

R_p – оптимальний ризиковий маршрут;

l_i – довжина сегмента шляху;

h_i – перепад висот;

z_i – рівень перешкод;

s_i – нестійкість поверхні;

w_i – вплив зовнішнього середовища;

$\lambda_1 \dots \lambda_5$ – вагові коефіцієнти.

Міське управління також отримує нові можливості. Якщо сенсори мостів, доріг, колекторів і висотних будівель інтегровані у Smart City платформу, дані переходять у режим оперативного диспетчерського використання. Дорожні потоки можна перенаправляти, ремонтні служби відправляти адресно, навантаження розподіляти за фактичним станом споруд (табл. 4).

Практичні засади впровадження штучного інтелекту в геоінформаційне середовище доцільно формувати через поєднання сенсорних геодезичних систем, цифрових платформ управління та аналітичних модулів обробки просторових даних. Насамперед потрібна інтеграція тахеометрів, GNSS-приймачів, лазерних сканерів і безпілотних платформ у єдину координатну базу з автоматичним узгодженням часових та просторових параметрів. Це забезпечить безперервне оновлення топографічних моделей, кадастрових шарів і цифрових двійників територій.

Другий напрям пов'язаний із впровадженням інтелектуальних модулів контролю якості даних. Алгоритми комп'ютерного зору мають автоматично виявляти аномалії вимірювань, втрату стабільності сигналу, зміщення контрольних точок та дефор-

4. Пропозиції щодо інтеграції геодезичних сенсорів у муніципальні центри оперативного управління (розроблено авторами)

№ з/п	Міський контур управління	Геодезичне джерело даних	Контрольний індикатор	Алгоритмічна реакція	Комунікаційний канал	Практичний результат
1	Дорожній центр	Сенсори мостів і шляхопроводів	Прогин та перевантаження	Перерозподіл потоків руху	Диспетчерська панель	Зниження зазорів і ризиків
2	Комунальний блок	Лінійні датчики колекторів	Зсув і просідання	Формування заявки ремонту	ERP-служби міста	Швидке усунення аварій
3	Будівельний нагляд	GNSS висотних споруд	Крен і осадка	Автоматичний аудит об'єкта	Кабінет інспектора	Посилення контролю
4	Цивільний захист	Дамби та укріплення	Нахил і фільтрація	Режим підвищеної готовності	Центр реагування	Підвищення безпеки
5	Транспортний департамент	Тунелі та станції	Деформації конструкцій	Позачергова перевірка	Оперативна мережа	Безперервність перевезень
6	Геотехнічний моніторинг	Кар'єри, схили, укуси	Ризик зсуву	Закриття небезпечної зони	Система сповіщення	Захист працівників
7	Міський аналітичний центр	Усі інтегровані джерела	Композитний індекс ризику	Пріоритезація ресурсів	Data Hub міста	Рациональне управління

маційні процеси інфраструктурних об'єктів. Це скорочує обсяг ручної перевірки та підвищує оперативність просторового аналізу. До речі, особливо ефективними такі рішення стають у міських системах моніторингу мостів, тунелів і транспортних вузлів.

Третя практична засада стосується створення муніципальних геоінформаційних центрів із функціями прогнозу аналітики. Інтелектуальні геодезичні системи повинні автоматично формувати сигнали ризику, сценарії реагування та пріоритетність ремонтних робіт. І в результаті просторові дані переходять із категорії архівної інформації у формат оперативного управлінського ресурсу. Це підвищує швидкість реагування на деформаційні процеси, оптимізує використання міських ресурсів та посилює безпеку критичної інфраструктури.

Висновки і перспективи

Інтеграція електронних геодезичних приладів з алгоритмами штучного інтелекту змінює принципи вимірювального процесу. Сучасні пристрої більше не обмежуються фіксацією координат. Вони постійно аналізують параметри навколишнього середовища. Системи автоматично перевіряють стабільність спостережень. Робочі режими коригуються без участі оператора. Подібні функції мінімізують вплив людського фактора. Кількість повторних вимірювань значно скорочується. Надійність отриманих даних підвищується за несприятливих польових умов. Поєднання тахеометрії з GNSS технологіями формує нову модель просторового моніторингу. Лазерне сканування та фотограмметрія доповнюють цю архітектуру. Безпілот-

ні комплекси забезпечують оперативний збір інформації. Окремі масиви просторових даних об'єднуються в єдине геоінформаційне середовище. Дані різних джерел узгоджуються за спільними координатними параметрами. Така організація прискорює оновлення топографічних планів. Зміни в забудові фіксуються з високою точністю. Інструменти стабільно відстежують деформації інженерних споруд. Швидкість формування цифрових двійників інфраструктури зростає. Отримані результати забезпечують обґрунтованість управлінських рішень. Впровадження розглянутих технологій підвищує ефективність геодезичного контролю.

Інтелектуалізація електронних геодезичних приладів у системах просторового управління має найбільший прикладний ефект у сфері безпеки критичної інфраструктури та міського оперативного управління. Йдеться про безперервний моніторинг мостів, дамб, тунелів, висотних споруд і транспортних вузлів. Такий моніторинг дає змогу фіксувати небезпечні тенденції ще до появи видимих дефектів. Як наслідок, зменшується ризик аварій, покращується розподіл ремонтних ресурсів, а технічний контроль переходить у режим прогностного управління замість запізненого реагування

Список використаної літератури

1. Дорожко Є. В., Удовенко І. О. Інтелектуальні технології в електронних геодезичних системах публічного просторового управління: еволюція від автоматизації до цифрово-етичних стандартів. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2025. № 4. С. 117–129. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.04.09>
2. Кухар М. А. Сучасні тенденції інтеграції геодезії, ГІС та штучного інтелекту для роботи з просторовими даними. *Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія*. 2025. № 4(192). С. 285–291. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-285-291>
3. Нестеренко С. Г., Радзінська Ю. Б., Євдокімов А. А., Штерндок Е. С. Сучасні аспекти методичного забезпечення геодезичного моніторингу об'єктів та територій. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2024. № 6(187). С. 199–203. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-199-203>
4. Akerele T. M., Owoigbe K. V., Idowu R. L. The Role of Artificial Intelligence in Automating Bathymetric Data Analysis and Feature Detection. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2025. Vol. 6. No 7. pp. 1850–1859. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15869266>
5. Hamzić A. Artificial intelligence in geodesy and geoinformatics: a review. *Glasnik Saveza geodetskih inženjera i geometara Bosne i Hercegovine*. 2023. No 54. С. 132–145. URL: https://glasnik.suggsbih.ba/glasnik/54/documents/GG54_132.pdf
6. Idowu T. O., Ilesanmi K. S. A Review of the Challenges and Prospects of Artificial Intelligence Applications in Gravimetric Geodesy. *Journal of Spatial Information Sciences*. 2025. Vol. 2. No 1. pp. 26–40. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14809386>
7. Karanikolas N., Kyriakidou E., Athanasouli E. Artificial Intelligence and Real Estate Valuation: *The Design and Implementation of a Multimodal Model*. *Information*. 2025. Vol. 16. No 12. p. 1049. DOI: <https://doi.org/10.3390/info16121049>
8. Mai G., Xie Y., Jia X., Lao N., Rao J., Zhu Q., Liu Z., Chiang Y.-Y., Jiao J. Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence. *International Journal of Applied*

- Earth Observation and Geoinformation*. 2025. Vol. 136. p. 104368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104368>
9. Makedon V. V., Yarmolenko L. I., Chumak T. V., Zaporozhchenko O. Y. Ensuring the implementation of commercialization strategies for satellite services in the digital economy. *Academy Review*. 2025. Vol. 2(63). Pp. 187–203. DOI: <https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-2-63-12>
 10. Makedon V., Myachin V., Alosyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*. 2025. Vol. 34. No. 5. Pp. 165–179. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296>
 11. Malashchuk O., Movchan T., Rozhi T. Intelligent technologies in the evolution of electronic geodetic instruments: conceptual basis for the integration of artificial intelligence into spatial management systems and geoinformation environments. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*. 2025. No 4. pp. 95–107. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.04.07>
 12. Odoh I. E., Tangwam M. AI Applications to Metes-and-Bounds Descriptions: Innovation, Accuracy, and the Evolving Practice of Land Surveying. *International Journal of Scientific Research and Technology*. 2026. Vol. 3. No 4. pp. 161–170.
 13. Pierdicca R., Paolanti M. GeoAI: a review of Artificial Intelligence approaches for the interpretation of complex Geomatics data. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. 2022. Vol. 11. No 1. pp. 195–218. DOI: <https://doi.org/10.5194/gi-11-195-2022>
 14. Shodiyev R. M., Xushvaqtov A. S. Modern Instruments Used in the Fields of Mine Surveying and Geodesy. *International Journal of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 5. No 07. pp. 329–333. URL: <https://www.academicpublishers.org/journals/index.php/ijai/article/view/5824/6739>
 15. Soja B., Kaselimi M., Asgarimehr M., Modiri S., Sharifi M. A., Belda S., Liu L., Omidalizarandi M., Śliwińska-Bronowicz J. The Role of AI in Modern Geodesy: Insights from GGOS Focus Area AI4G. IAG Scientific Assembly 2025. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-c-000783501>
 16. Zhang G., Cheng H., Yang H. Research on the Application of Industrial Robot Technology in Large-Scale Geodetic Data Acquisition. *Journal of Environmental & Earth Sciences*. 2026. Vol. 8. No 2. pp. 157–182. DOI: <https://doi.org/10.30564/jees.v8i2.13075>
-

References

1. Dorozhko, Ye. V., & Udovenko, I. O. (2025). Intelktualni tekhnologii v elektronnykh heodezychnykh systemakh publichnoho prostorovoho upravlinnia: evoliutsiia vid avtomatyzatsii do tsyfrovo-etychnykh standartiv [Intelligent technologies in electronic geodetic systems of public spatial management: evolution from automation to digital-ethical standards]. *Zemleustrii, kadastr i monitorynh zemel - Land Management, Cadastre and Land Monitoring*, 4, 117–129. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.04.09>
2. Kukhar, M. A. (2025). Suchasni tendentsii intehratsii heodezii, HIS ta shtuchnoho intelektu dlia roboty z prostorovymy danymy [Modern trends in the integration of geodesy, GIS and artificial intelligence for working with spatial data]. *Komunalne hospodarstvo mist. Serii: Informatsiini tekhnologii ta inzheneriia - Municipal Economy of Cities. Series: Information Technologies and Engineering*, 4(192), 285–291. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-285-291>
3. Nesterenko, S. H., Radzinska, Yu. B., Yevdokimov, A. A., & Shterndok, E. S. (2024). Suchasni aspekty metodychnoho zabez-

- pechennia heodezychnoho monitorynu hu obiektyv ta terytorii [Modern aspects of methodological support for geodetic monitoring of objects and territories]. *Komunalne hospodarstvo mist. Serii: Tekhnichni nauky ta arkhitektura - Municipal Economy of Cities. Series: Engineering Sciences and Architecture*, 6(187), 199–203. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-199-203>
4. Akerele, T. M., Owoigbe, K. V., & Idowu, R. L. (2025). The role of artificial intelligence in automating bathymetric data analysis and feature detection. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 6(7), 1850–1859. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15869266>
 5. Hamzić, A. (2023). Artificial intelligence in geodesy and geoinformatics: a review. *Glasnik Saveza geodetskih inženjera i geometara Bosne i Hercegovine*, 54, 132–145. https://glasnik.suggsbih.ba/glasnik/54/documents/GG54_132.pdf
 6. Idowu, T. O., & Ilesanmi, K. S. (2025). A review of the challenges and prospects of artificial intelligence applications in gravimetric geodesy. *Journal of Spatial Information Sciences*, 2(1), 26–40. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14809386>
 7. Karanikolas, N., Kyriakidou, E., & Athanasouli, E. (2025). Artificial intelligence and real estate valuation: *The design and implementation of a multimodal model. Information*, 16(12), 1049. <https://doi.org/10.3390/info16121049>
 8. Mai, G., Xie, Y., Jia, X., Lao, N., Rao, J., Zhu, Q., Liu, Z., Chiang, Y.-Y., & Jiao, J. (2025). Towards the next generation of geospatial artificial intelligence. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 136, 104368. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104368>
 9. Makedon, V. V., Yarmolenko, L. I., Chumak, T. V., & Zaporozhchenko, O. Y. (2025). Ensuring the implementation of commercialization strategies for satellite services in the digital economy. *Academy Review*, 2(63), 187–203. <https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-2-63-12>
 10. Makedon, V., Myachin, V., Alohyna, T., Cherniavska, I., & Karavan, N. (2025). Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*, 34(5), 165–179. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296>
 11. Malashchuk, O., Movchan, T., & Rozhi, T. (2025). Intelligent technologies in the evolution of electronic geodetic instruments: conceptual basis for the integration of artificial intelligence into spatial management systems and geoinformation environments. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*, 4, 95–107. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.04.07>
 12. Odoh, I. E., & Tangwam, M. (2026). AI applications to metes-and-bounds descriptions: Innovation, accuracy, and the evolving practice of land surveying. *International Journal of Scientific Research and Technology*, 3(4), 161–170.
 13. Pierdicca, R., & Paolanti, M. (2022). GeoAI: a review of artificial intelligence approaches for the interpretation of complex geomatics data. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 11(1), 195–218. <https://doi.org/10.5194/gi-11-195-2022>
 14. Shodiyev, R. M., & Xushvaqtov, A. S. (2025). Modern instruments used in the fields of mine surveying and geodesy. *International Journal of Artificial Intelligence*, 5(07), 329–333. <https://www.academicpublishers.org/journals/index.php/ijai/article/view/5824/6739>
 15. Soja, B., Kaselimi, M., Asgarimehr, M., Modiri, S., Sharifi, M. A., Belda, S., Liu, L., Omidalizarandi, M., & Śliwińska-Bronowicz, J. (2025). The role of AI in modern geodesy: Insights from GGOS Focus Area AI4G. IAG Scientific Assembly 2025. <https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-2-63-12>

org/10.3929/ethz-c-000783501
16. Zhang, G., Cheng, H., & Yang, H. (2026).
Research on the application of industrial
robot technology in large-scale geodetic

data acquisition. *Journal of Environmental
& Earth Sciences*, 8(2), 157–182. [https://
doi.org/10.30564/jees.v8i2.13075](https://doi.org/10.30564/jees.v8i2.13075)

Udovenko I., Arsenieva N., Shemiakin M.

**THE INTELLECTUALIZATION OF ELECTRONIC SURVEYING INSTRUMENTS IN
SPATIAL MANAGEMENT SYSTEMS AS A FOUNDATION FOR THE INTEGRA-
TION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO THE GEOINFORMATION ENVIRON-
MENT**

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 2'26: 113-126.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.02.08>

Abstract. Abstract. The article is devoted to the formation of applied principles of intellectualization of electronic geodetic instruments through their integration with artificial intelligence (AI) technologies. The purpose of the article is to develop applied foundations for the intellectualization of electronic geodetic instruments through their integration with artificial intelligence (AI) technologies. The study is devoted to the transition from traditional measuring devices to adaptive geodetic systems. Such complexes maintain metrological stability in a changing environment. The methodology is based on a technical-analytical approach and structural modeling of intelligent devices. A comparative assessment of functional operating modes was carried out. An analysis of time series of geodetic observations was performed. Practices of artificial intelligence application in geoinformation systems were generalized. The information base consisted of the technical parameters of total stations and GNSS receivers. The characteristics of laser scanners and sensor monitoring platforms were used. Data from digital urban infrastructure management systems were applied.

The results confirm the effectiveness of computer vision algorithms. Software modules automatically recognize survey poles and prisms under field conditions. The systems identify control marks and spatial reference points without manual adjustment. This approach reduces the time required for instrument targeting. The number of repeated observations is significantly decreased. Built-in diagnostic tools detect temperature drift at early stages. Algorithms identify vibration effects and power instability. The system monitors calibration deviations in real time. This prevents errors from reaching a critical state. Integration of total station surveying with GNSS and LiDAR improves data accuracy. The use of photogrammetry and unmanned platforms accelerates the updating of topographic plans. Digital terrain models and cadastral databases are generated more efficiently. Geodetic sensors operate effectively in continuous monitoring networks. They are used for monitoring bridges and dams. The systems track the condition of tunnels and high-rise structures. The practical value lies in the development of a concept for a new generation of geodetic complexes. New instruments combine precise measurements with predictive analytics. Software automatically supports management decision-making. The scientific novelty is determined by a comprehensive approach to the integration of artificial intelligence. Instrumental tools are combined with analytical models. Infrastructural aspects of technology implementation in geodetic practice are taken into account.

Keywords: artificial intelligence, geodetic instruments, spatial management, laser scanning, infrastructure monitoring, digital twins.