
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕЛЕКТРОННИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ СИСТЕМАХ ПУБЛІЧНОГО ПРОСТОРОВОГО УПРАВЛІННЯ: ЕВОЛЮЦІЯ ВІД АВТОМАТИЗАЦІЇ ДО ЦИФРОВО-ЕТИЧНИХ СТАНДАРТІВ

Є.В. ДОРОЖКО,

кандидат технічних наук, доцент

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

E-mail: evgeniy.dorozhko@gmail.com

І.О. УДОВЕНКО,

кандидат економічних наук, доцент

E-mail: irinaudovenko8@gmail.com

Уманський національний університет

Анотація. Стаття присвячена інтелектуалізації електронні геодезичні прилади (ЕГП) та розробленню концептуальних основ інтеграції технологій штучного інтелекту (ШІ) в геоінформаційне середовище (ГІС) з метою підвищення ефективності систем просторового управління. У дослідженні представлено розроблену архітектурну модель інтелектуалізованої системи просторового управління, яка включає взаємодію електронних приладів, сенсорних модулів, ГІС-платформ та аналітичних ШІ-сервісів. Запропоновано концепцію інтелектуалізації ЕГП, яка ґрунтується на трьох основних векторах: автономність вимірювального процесу (за допомогою машинного навчання МН для розпізнавання об'єктів, самодіагностики), адаптивність до умов навколишнього середовища (через корекцію впливу навколишнього середовища, зменшення шуму) та інтегративність у ГІС. У роботі описано застосування ШІ-методів, включаючи глибинні нейронні мережі (YOLO, Mask R-CNN, U-Net, PointNet) для автоматичної детекції та класифікації об'єктів на зображеннях і хмарах точок, а також для оцінювання та корекції GNSS-похибок у реальному часі за допомогою нейро-Калманівських фільтрів. Практичні напрями впровадження моделі включають автоматизований моніторинг деформацій інженерних споруд та інтелектуальну обробку даних БПЛА для оновлення топографічних планів. Згідно з висновками, поетапна інтеграція ШІ перетворює ЕГП на інтелектуальні сенсори, здатні самостійно оцінювати якість даних та взаємодіяти з ГІС, що забезпечує надійну основу для «розумних» міст та стійкого територіального розвитку.

Ключові слова: інтелектуалізація, штучний інтелект (ШІ), електронні геодезичні прилади (ЕГП), ГІС-середовище, системи просторового управління, детекція об'єктів, GNSS-корекція.

Постановка проблеми

Сучасні системи просторового управління дедалі більше залежать від точності, швидкості та інтелектуальної обробки геодезичних даних. Розвиток електронних геодезичних приладів – тахеометрів, GNSS-приймачів, дронів і лазерних сканерів – значно підвищив ефективність вимірювальних процесів, проте більшість із них залишаються інструментами, що вимагають людської участі на всіх етапах збору, аналізу та інтерпретації даних. Це обмежує їхню продуктивність і створює ризики помилок, спричинених людським фактором. Зростання обсягів просторової інформації та потреба в її оперативному аналізі спричинили необхідність в інтелектуалізації геодезичних систем. Тобто, впровадження алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) для автоматизованого розпізнавання об'єктів, оцінки якості даних, самокорекції вимірювань і прийнятті рішень у реальному часі. Незважаючи на активний розвиток ШІ у суміжних галузях (робототехніка, дистанційне зондування Землі, містобудівне планування), рівень його інтеграції в геодезичні прилади поки залишається фрагментарним і не має єдиної методологічної основи.

Важливою проблемою є відсутність концептуальної моделі впровадження ШІ у геоінформаційне середовище, яке поєднує дані з різних джерел, забезпечує їх семантичну узгодженість та підтримує прийняття рішень у системах просторового управління. Розроблення концептуальних основ інтелектуалізації електронних геодезичних приладів на базі штучного інтелекту, дозволить підвищити точність, автономність та

адаптивність систем просторового управління в сучасному геоінформаційному середовищі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика інтеграції штучного інтелекту у сферу геодезії та геоінформаційних систем (ГІС) останніми роками привертає значну увагу науковців у світі. У працях зарубіжних дослідників, зокрема [1;2;3], розглядаються підходи до автоматизації збору та обробки геоданих за допомогою алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж і комп'ютерного зору. Такі дослідження демонструють можливість суттєвого підвищення точності позиціонування, оптимізації маршруту вимірювань та автоматичного розпізнавання об'єктів місцевості.

В Україні питання інтелектуалізації геодезичних приладів поки що перебуває на етапі концептуального осмислення. У наукових працях розглянуто питання цифрової трансформації геодезичних процесів [4;5], розвитку автоматизованих систем моніторингу територій [6;7], інтеграції GNSS-даних у ГІС середовища [8]. Проте більшість досліджень фокусуються переважно на технічних або програмних аспектах, тоді як питання розроблення інтелектуальних моделей взаємодії приладів і ГІС залишається недостатньо вивченим. Окремі роботи присвячені використанню штучного інтелекту для класифікації супутникових зображень, прогнозування деформацій земної поверхні [9], створення 3D-моделей місцевості [10], аналізу просторових трендів та геопросторової аналітики на основі ШІ [11;12]. Проте їх резуль-

тати здебільшого мають галузевий або експериментальний характер і не формують узагальненої методології застосування ШІ в геодезичних системах вимірювань.

Мета дослідження – сформулювати концептуальні основи інтелектуалізації електронних геодезичних приладів, запропонувати архітектуру їх інтеграції в ГІС-середовище і надати практичні рекомендації щодо впровадження.

Матеріали і методи наукового дослідження

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні аналітичних, експериментальних та обчислювальних підходів, які разом забезпечують всебічне оцінювання технологічних, алгоритмічних і функціональних засад роботи інтелектуальних електронних геодезичних інструментів (ЕГІ). Основним джерелом емпіричного матеріалу у дослідженні стали набори даних, отримані за допомогою сучасних електронних тахеометрів, GNSS-приймачів, електронних нівелірів, LiDAR-систем і безпілотних літальних апаратів, оснащених оптичними та мультиспектральними сенсорами. Ці набори даних використовувалися для оцінювання точності, стабільності та адаптивності вимірювальних процесів за різних умов довілля та експлуатації.

Для дослідження потенціалу штучного інтелекту у підвищенні надійності вимірювань було застосовано декілька класів моделей машинного навчання. Згорткові нейронні мережі (CNN), а також архітектури U-Net і Mask R-CNN використовувалися для детекції об'єктів і семантичної сегментації просторових зо-

бражень, тоді як рекурентні нейронні мережі (LSTM) та гібридні моделі, що інтегрують фільтрацію Калмана, застосовувалися для оцінювання та компенсації відхилень координат GNSS, спричинених мультипом, іоносферними збуреннями та перешкодами в умовах урбанізованої забудови. Крім того, методи ансамблевого навчання — Random Forest і Gradient Boosting – використовувалися для побудови прогнозних моделей оцінювання похибок з урахуванням метеорологічних та техногенних чинників.

Експериментальна верифікація включала порівняльне тестування традиційних і удосконалених штучним інтелектом обчислювальних процедур у середовищі ГІС. Просторовий аналіз, інтеграція растрових і векторних даних та перевірка топологічної узгодженості виконувалися із використанням QGIS і ArcGIS Pro. Статистичне оцінювання результатів ґрунтувалося на показниках RMSE, MAE та кореляційних коефіцієнтах для підтвердження підвищення точності позиціонування. Методологічна база також включала системне моделювання запропонованої п'ятирівневої архітектури інтеграції інтелектуальних сенсорів у ГІС-процеси, що забезпечило теоретичну обґрунтованість і практичну застосовність отриманих результатів.

Результати дослідження та їх обговорення

Штучний інтелект (ШІ) – це широка та багатогранна галузь, що охоплює різні підходи, технології та методи вирішення проблем. Абревіатура ШІ наразі асоціюється, завдяки стартапам, які фінансово підтримують великі технологічні гравці

(Microsoft, Google, Amazon, Meta, Apple тощо) та інші організації, з інтерактивними моделями великих мов програмування (LLM), такими як: ChatGPT, Gemini, Claude та інші менш відомі моделі. Ці комерційні рішення доступні за підпискою або в обмежених версіях практично для всіх [2].

Штучний інтелект, загалом, – це вивчення та проєктування інтелектуальних агентів, де інтелектуальний агент – це система, яка сприймає своє середовище та вживає дії, що максимізують її шанси на успіх. Багато реальних проблем вимагають від агента роботи з неповною або невизначеною інформацією. Методи, що використовуються для невизначених міркувань, мають ймовірнісний характер, такі як байєсівські мережі, які являють собою загальний інструмент з вирішення великої кількості проблем, наприклад, міркування (з використанням байєсівського алгоритму висновку), навчання (з використанням алгоритму максимізації очікувань), планування (з використанням мереж прийняття рішень) та сприйняття (з використанням динамічних байєсівських мереж). Використання методів штучного інтелекту має багато переваг у порівнянні з традиційними стратегіями розробки та впровадження [13]: швидкий доступ до зібраних знань (наприклад, системи, засновані на знаннях), легкість впровадження прототипів без глибоких експертних знань (наприклад, штучні нейронні мережі) або системи, здатні до навчання (наприклад, генетичні алгоритми).

Методи та техніки штучного інтелекту широко використовуються в геодезії та ГІС. До них можна віднести:

- автоматична детекція та кла-

сифікація об'єктів на зображеннях і хмарах точок;

- оцінювання та корекція точності GNSS-показів з урахуванням локальних умов сигналу за допомогою ІІІ;

- компенсація шумів та фільтрація даних реального часу (фільтри Калмана із вбудованими нейромережами);

- семантична прив'язка результатів вимірювань до онтологічних моделей просторових об'єктів для полегшення інтеграції в ГІС.

Детекція об'єктів (object detection) – це процес виявлення та локалізації об'єктів певного класу на цифровому зображенні. Сучасні підходи базуються на глибинних згорткових нейронних мережах (convolutional neural network (CNN)), які здатні автоматично витягати ознаки без попереднього ручного налаштування для автоматичного ідентифікування цілей (штучних, природних об'єктів) та фільтрації перешкод у реальному часі (табл. 1). Це важливо для лазерного сканування та роботи роботизованих тахеометрів (наприклад, Leica TS20) [14].

Хмара точок – це набір тривимірних координат, що представляє форму поверхні об'єктів, отриману за допомогою лідарного (LiDAR) або фотограмметричного сканування. Оброблення таких даних вимагає спеціалізованих алгоритмів, оскільки інформація подається у вигляді незв'язних 3D-точок без кольору або текстури. Сучасні методи автоматичного аналізу включають:

- PointNet і PointNet++ – перші нейронні мережі, що безпосередньо працюють із неструктурованими 3D-точками;

- PointCNN, KPConv та RandLA-Net – модифіковані архітектури,

Таблиця 1. Методи штучного інтелекту для аналізу геопросторових даних

Категорія завдання	Метод (Архітектура)	Характеристика	Застосування у ГІС
Детекція об'єктів	Faster R-CNN	Двоетапна модель, що поєднує регіональні пропозиції (Region Proposals) з класифікацією та локалізацією об'єктів. Висока точність, але повільніша за одноступінчасті	Автоматичне розпізнавання будівель, доріг, транспортних засобів та зелених насаджень на аерофото- і супутникових знімках; виявлення змін у забудові; аналіз територій в урбаністичних дослідженнях
	YOLO (You Only Look Once)	Одноступінчастий детектор об'єктів, який виконує класифікацію та локалізацію за один прохід мережі. Дозволяє виявляти об'єкти в реальному часі на зображеннях та відео	Швидкий моніторинг руху транспорту, виявлення об'єктів у відеопотоці з дронів, оперативне виявлення катастроф
	Mask R-CNN	Mask R-CNN розширення Faster R-CNN для одночасної детекції та сегментації контурів об'єктів (екземплярна сегментація)	Точне виділення контурів окремих об'єктів (будівель, дерев, транспортних засобів); створення високоточних кадастрових карт
Класифікація та семантична сегментація	Fully Convolutional Networks (FCN)	Архітектура глибокого навчання, яка замінює повністю зв'язані шари на згорткові, що дозволяє отримувати карти класифікації (сегментаційні маски) для зображень будь-якого розміру	Тематичне картографування (лісових масивів, водних джерел, міського планування), аналіз супутникових зображень, моніторинг довкілля, точне землеробство та оцінка землекористування
	U-Net	Архітектура з симетричним кодером-декодером (U-подібна форма), яка використовує з'єднання обходу (skip connections) для передачі високороздільних ознак від кодера до декодера. Це забезпечує високу точність локалізації об'єктів	Високоточна семантична та екземплярна сегментація об'єктів (використовується в медицині та ГІС для точного виділення областей)
	DeepLabv3+	Архітектура, яка застосовує удосконалений підхід із використанням атрибутів просторового пірамідального пулу (Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP) для захоплення контексту на різних масштабах. Висока продуктивність у семантичній сегментації	Обробка великомасштабних знімків, точна семантична сегментація складних сцен (наприклад, розмежування міських територій та природних ландшафтів)
	SegNet	Архітектура семантичної сегментації типу кодер-декодер, де декодер використовує індекси пулінгу (pooling indices) з відповідних шарів кодера для незгорткового підвищення дискретизації (unpooling). Це зменшує потребу в запам'ятовуванні	Семантична сегментація дорожніх сцен, мобільне роботехнічне картографування, ефективна обробка великих обсягів геопросторових даних

Сформовано авторами на основі [4, 12]

оптимізовані для великих обсягів геопросторових даних;

- Voxel-based моделі, що перетворюють хмару точок на воксельну сітку для обробки звичайними CNN.

Завдяки цим підходам стає можливою: автоматична класифікація об'єктів (будівлі, дороги, дерева, лінії електропередач тощо); виявлення змін у 3D-моделях місцевості; створення цифрових моделей поверхні та рельєфу з високою деталізацією [15].

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) – GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou – є основним джерелом просторово-часових даних для геодезії, навігації, транспорту та моніторингу довкілля. Точність GNSS-вимірювань значно залежить від локальних умов приймання сигналів: багатопроменевого поширення, затінення антен, атмосферних впливів, радіоперешкод і геометрії розташування супутників. З огляду на складність цих факторів, застосування штучного інтелекту (ШІ) відкриває нові можливості для оцінювання, прогнозування та корекції похибок GNSS-сигналів у реальному часі. ШІ-технології використовують для: виявлення аномалій у даних GNSS у режимі реального часу; моделювання просторово-часових закономірностей похибок; прогнозування впливу локальних факторів на якість сигналу; постпроцесингової та оперативної корекції координат. Методи штучного інтелекту для підвищення точності GNSS: класичні алгоритми машинного навчання – Random Forest, Support Vector Regression (SVR), Gradient Boosting; глибинні нейронні мережі (DNN, LSTM, CNN); гібридні моделі GNSS-INS-AI, характеристики, яких представлені в таблиці 2 [16].

Одним із ключових завдань під час оброблення GNSS-спостережень є компенсація шумів і випадкових похибок, що виникають через нестабільність сигналу, атмосферні впливи та динамічні умови руху приймача. Для цієї мети традиційно застосовується фільтр Калмана (Kalman Filter) – оптимальний рекурсивний алгоритм, який оцінює поточний стан системи (координати, швидкість, прискорення) на основі попередніх вимірювань і статистичних характеристик шумів. Сучасні підходи поєднують фільтри Калмана з нейронними мережами, утворюючи нейро-Калманівські фільтри (Neural Kalman Filters). У таких моделях нейронна мережа (зазвичай LSTM або DNN) навчається прогнозувати або адаптивно оцінювати параметри шуму процесу та вимірювань. Практичні дослідження показують, що інтеграція нейронних мереж у структуру фільтра Калмана дозволяє зменшити середню похибку позиціонування на 30–50 %, а також забезпечує плавність траєкторій при високій частоті оновлення вимірювань (1–10 Гц) [17].

Семантична прив'язка вимірювань передбачає узгодження результатів геодезичних або GNSS-спостережень з онтологічними моделями просторових об'єктів, які описують структуру, властивості та взаємозв'язки елементів території. Такий підхід забезпечує смислову інтерпретацію даних, коли координати та геометрія поєднуються з атрибутами об'єктів (тип, функція, стан, приналежність тощо). Методи ШІ, зокрема машинне навчання, обробка природної мови (NLP) та глибинні нейронні мережі, дозволяють: автоматично визначати семантику об'єктів, з подальшим призначенням їм онтологіч-

Таблиця 2. Методи штучного інтелекту для оцінювання та корекції GNSS-похибок

Тип моделі ШІ	Вхідні дані	Функціональне призначення	Очікуваний ефект / точність	Приклади застосування
Random Forest (RF)	Параметри супутникового сигналу (SNR, кількість супутників, кут піднесення, DOP)	Прогнозування координатних похибок на основі статистичних закономірностей	Зменшення похибки позиціонування на 20–30 % порівняно зі стандартними моделями	Аналіз якості сигналу у міському середовищі
Support Vector Regression (SVR)	Часові ряди координат, рівень сигналу	Моделювання нелінійної залежності між рівнем сигналу та зміщенням координат	Зменшення середньоквадратичної похибки (RMSE) до 1,5–2 м	Постобробка GNSS-треків у транспортних системах
Support Vector Regression (SVR)	Часові ряди координат, рівень сигналу	Моделювання нелінійної залежності між рівнем сигналу та зміщенням координат	Зменшення середньоквадратичної похибки (RMSE) до 1,5–2 м	Постобробка GNSS-треків у транспортних системах
Gradient Boosting / XGBoost	Метеорологічні та геометричні параметри спостережень	Корекція іоносферних і тропосферних впливів	Поліпшення стабільності координат на 25–40 %	Сільсько-господарські GNSS-спостереження
LSTM (Long Short-Term Memory)	Часові ряди сигналів, швидкість, прискорення, доплерівські вимірювання	Прогнозування короткострокових зміщень координат; адаптивна фільтрація шумів	Зменшення похибки в динамічних умовах до 1 м	Моніторинг рухомих об'єктів, автономний транспорт
CNN (Convolutional Neural Network)	Просторові карти GNSS-точності, цифрові моделі місцевості	Виявлення просторових закономірностей похибок, облік рельєфу та забудови	Підвищення точності позиціонування на 30–50 %	Урбанізовані території, міські каньйони
DNN (Deep Neural Network)	Комплексні дані GNSS + INS + метеопараметри	Комбіноване моделювання похибок за різних факторів	Поліпшення узагальненої точності на 40–60 %	Геодезичні вимірювання в складних умовах прийому сигналу
Ensemble Learning (різні моделі)	Різноманітні дані з різних приймачів або сенсорів	Об'єднання прогнозів різних моделей для зменшення випадкових похибок	Підвищення стабільності та узгодженості результатів	Системи RTK/PPP реального часу

Сформовано авторами на основі [1, 6, 14]

них категорій; виявляти семантичні зв'язки між об'єктами, створюючи семантичні граfi простору; інтегрувати різноманітні дані (з різних джерел – GNSS-вимірювань, LiDAR, кадастрових баз, супутникових знімків) у ГІС і виконувати їхнє семантичне узгодження в єдиному інформаційному середовищі; підтримувати інтелектуальний аналіз і запити [18].

Інтеграція штучного інтелекту

(ШІ) у геодезичні технології відбувається поступово та охоплює всі етапи життєвого циклу даних – від польових вимірювань до побудови цифрових моделей місцевості. Загалом можна виділити п'ять основних етапів такої інтеграції:

Етап збору даних (Data Acquisition), під час якого ШІ застосовують для оптимізації процесу вимірювань у реальному часі – автоматичного ви-

бору найкращих супутників GNSS, адаптивного налаштування частоти вимірів та контролю якості сигналів. У приладах нового покоління (розумні тахеометри, GNSS-приймачі) ШІ-модулі аналізують стабільність спостережень і можуть автоматично сигналізувати про зниження точності або рекомендувати повторне вимірювання.

Етап попередньої обробки (Preprocessing) передбачає використання алгоритмів машинного навчання для фільтрації шумів, компенсації мультипас-ефектів і видалення помилкових вимірювань. На цьому етапі застосовуються нейро-Калманівські фільтри або рекурентні нейронні мережі (RNN, LSTM), які виконують реальну адаптацію параметрів фільтра залежно від умов приймання сигналу.

Етап аналізу та інтерпретації (Processing & Interpretation), де ШІ виконує автоматичну класифікацію, детекцію об'єктів і сегментацію зображень або хмар точок, що суттєво скорочує час камеральної обробки. Для цього використовуються глибокі нейронні мережі типу U-Net, Mask R-CNN, PointNet++, які розпізнають об'єкти місцевості (будівлі, дороги, рослинність тощо) у тривимірних даних.

Етап інтеграції в ГІС та моделювання (Integration & Modeling), на якому результати вимірювань проходять семантичну прив'язку до онтологічних моделей просторових об'єктів, що забезпечує узгодження з геоінформаційними базами, а ШІ-модулі відповідають за узгодження координат, атрибутів і семантики, автоматизуючи введення нових об'єктів у ГІС.

Етап прогнозування та прийняття

рішень (Prediction Decision Support) як завершальний етап використовує ШІ для аналізу тенденцій змін (деформацій, осідань, рухів ґрунту) та прогнозування їх подальшого розвитку. Інтелектуальні системи можуть у режимі реального часу пропонувати оптимальні сценарії дій, наприклад, повторні вимірювання або корекцію параметрів геодезичної мережі.

Відповідно концепція інтелектуалізації ґрунтується на трьох основних векторах – автономність вимірювального процесу, адаптивність до умов навколишнього середовища та інтегративність у геоінформаційне середовище (ГІС). Автономність вимірювального процесу досягається за допомогою вбудованих алгоритмів машинного навчання (МН) для розпізнавання та класифікації об'єктів (лазерне сканування), автоматичного планування траєкторії або позиціонування (самостійний вибір точок стояння, послідовність знімання, коригування траєкторії польоту БПЛА), самодіагностики та калібрування (аналізу внутрішніх параметрів приладу, виявлення дрейф сенсорів, температурні деформації або виконання автоматичного коригування калібрувальних констант). Адаптивність здатність ЕГП динамічно змінювати параметри вимірювання залежно від зовнішніх умов, досягається через корекцію атмосферних впливів та адаптивного зменшення шуму. Інтегративність дозволяє інтелектуальним ЕГП стати активними вузлами в системі просторового управління (СПУ), а не просто збирачами даних як «розумний» збір даних (отримання інформації з центральної ГІС-бази для оптимізації польових робіт) та миттєва обробка та аналіз, завдяки вбудованому ШІ-модулі ви-

конувати Edge Computing – первинно обробляти та інтерпретувати дані.

Архітектурна модель інтеграції інтелектуальних електронних приладів в ГІС-середовище передбачає узагальнене представлення структури та взаємозв'язків між складовими інтелектуалізованої геодезичної системи у контексті геоінформаційного середовища. Метою, якої є визначення логічної взаємодії між електронними геодезичними приладами, системами збору та оброблення даних, алгоритмами штучного інтелекту й підсистемами управління просторовими процесами. У структурі концептуальної архітектури виділено п'ять основних рівнів: збору первинних геоданих; передавання та інтеграції даних; інтелектуальної обробки; геоінформаційного аналізу та візуалізації; прийняття управлінських рішень (рис. 1).

Практичні напрями, впровадження запропонованої архітектурної моделі інтеграції в реальних умовах, демонструють, як поєднання геодезичних технологій, штучного інтелекту та геоінформаційного середовища забезпечуючи підвищення ефективності збору, оброблення й аналітики просторових даних. Одним із перспективних напрямів є автоматизований моніторинг деформацій інженерних споруд, спрямований на раннє виявлення небезпечних змін у геометрії об'єктів, таких як мости, дамби чи будівлі. У цьому випадку електронні тахеометри та GNSS-приймачі безперервно фіксують координати контрольних точок, передаючи інформацію до геоінформаційної системи, де алгоритмами штучного інтелекту здійснюють аналіз часових рядів і визначають потенційно небезпечні тенденції. Отримані результати дозволяють забезпечити оперативне

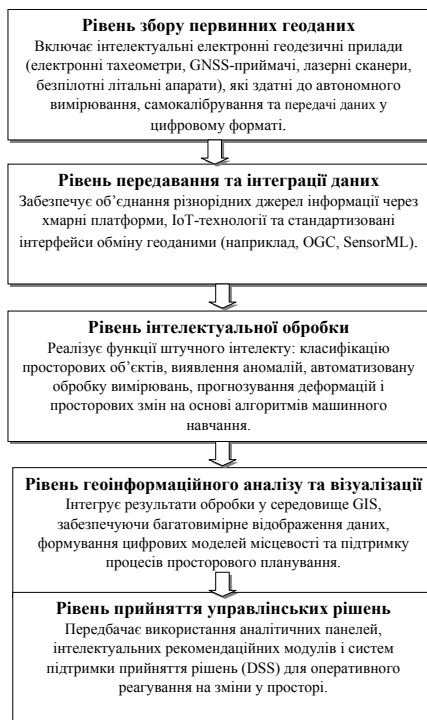


Рис. 1. Архітектурна модель інтеграції інтелектуальних електронних приладів в ГІС-середовище

Розроблено авторами

реагування на деформаційні процеси та запобігти аварійним ситуаціям [6].

Окреме значення має моніторинг змін у землекористуванні викликаний геодинамічними процесами та негативною діяльністю людини. У цьому випадку мережа геодезичних сенсорів і GNSS-станцій забезпечує постійний контроль мікророзміщень земної поверхні, а алгоритми машинного навчання прогнозують ризики на основі аналізу історичних даних, погодних умов і геологічних характеристик [1,6].

Інтеграція даних з геодезичних приладів, супутникових знімків і

державних кадастрових баз з алгоритми штучного інтелекту забезпечує автоматичне виявлення змін у землекористуванні, сприяючи підвищенню прозорості управління земельними ресурсами та своєчасному оновленню кадастрової інформації. Все це демонструє універсальність і практичне значення інтелектуальної архітектурної моделі, яка забезпечує гнучку інтеграцію геодезичних приладів, систем збору даних та аналітичних технологій штучного інтелекту в єдиному геоінформаційному просторі, сприяючи підвищенню точності, оперативності й ефективності процесів просторового управління [6;18].

Висновки

Впровадження ШІ в електронні геодезичні прилади є новим етапом еволюції геоінформаційного середовища. Інтелектуалізація електронних геодезичних приладів відкриває значний потенціал для підвищення оперативності, точності й автоматизації просторового управління. Концептуальні основи, що охоплюють автономність, адаптивність та інтегративність, забезпечують перетворення ЕГП зі звичайних вимірювальних інструментів на інтелектуальні сенсори, які активно беруть участь у процесах просторового управління. Комбінація локальної обробки та хмарних ШІ-сервісів дозволяє отримувати адаптивні рішення, що враховують місцеві умови збору даних. При цьому забезпечення якості даних, інтероперабельність та безпека є головним викликом сьогодення. Рекомендований підхід передбачає поетапне, модульне впровадження з акцентом на пілотні випробування,

стандартизацію форматів і застосування MLOps-практик. Це призведе до суттєвого підвищення ефективності, точності та оперативності геодезичних робіт, забезпечуючи надійну основу для «розумних» міст та стійкого територіального розвитку.

Майбутні дослідження повинні зосередитися на оптимізації Edge AI для вбудовування в геодезичні прилади, створенні уніфікованих навчальних датасетів для підвищення надійності моделей ШІ у моніторингу, управлінні ризиками та прогнозуванні деформацій.

Список використаної літератури

1. Bill R., Blankenbach J., Breunig M., Haunert JH., Heipke C. Geospatial Information Research: State of the Art, Case Studies and Future Perspectives. *J Photogramm Remote Sens Geoinform Sci*. 2022. № 90(4). P. 349-389. doi: 10.1007/s41064-022-00217-9.
2. Rudewicz Ja. Theoretical Insights into Artificial Intelligence Applications in Human Geography and Spatial Management (GeoAI). *European Research Studies Journal*. 2024. Volume XXVII, Issue 4, P. 973-984.
3. Tuia D., Roscher R., Jacobs N. Towards a Collective Agenda on AI for Earth Science Data Analysis.: *IEEE Geoscience and Remote Sensing*. 2021. Volume: 9. Issue: 2. P. 88 – 104. DOI: 10.1109/MGRS.2020.3043504
4. Артемов В., Мовчан Т., Бахчеван Е., Данько Т. Принципи цифрової трансформації і впровадження її в геодезію та землеустрій. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2020. Issue 96. С. 129-138.
5. Максименко М. А., Бондар А. В. Використання ГІС у інженерно-геодезичних вишукуваннях при проектуванні доріг. *Сучасні технології, матеріали і*

- конструкції в будівництві. 2025. Вип. 38(1). С. 129–135. DOI: 10.31649/2311-1429-2025-1-129-135.
6. Ступень О. І., Прокопенко Н. І., Шевчук С. М. Цифрова трансформація системи землеустрою: автоматизація управлінських процесів у сфері використання та охорони земельних ресурсів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 212. С. 172–184. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296>
7. Браславська О.В. ГІС-технології та дистанційне зондування у моніторингу змін землекористування. *Містобудування та територіальне планування*. 2025. № 89. С.472–487. DOI: 10.32347/2076-815X.2025.89.472-487
8. Боровий В. О., Браславська О. В., Рожі Т. А. Інтеграція аналогового та цифрового знімання в системах землеустрою: нові можливості для геодезичних досліджень. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. № 212. С. 195–207. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336377>
9. Лазоренко Н. Ю. Дослідження застосування штучного інтелекту (GEOAI) для завдань топографічного картографування. *Просторовий розвиток*. 2024. № 8. С. 430–443. DOI: 10.32347/2786-7269.2024.8.430-443
10. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3
11. Tuia D., Roscher R, Wegner Ja. Dirk Toward a Collective Agenda on AI for Earth Science Data Analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*. 2021. №10
12. Hochmair HH, Juhász L, Li H. Advancing AI-Driven Geospatial Analysis and Data Generation: Methods, Applications and Future Directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2025. № 14(2):56. <https://doi.org/10.3390/ijgi14020056>
13. Reiterer A., Egly U. Application of artificial intelligence in Geodesy – A review of theoretical foundations and practical examples. *Journal of Applied Geodesy*. 2010. № 4. P. 201–217. DOI 10.1515/JAG.2010.020
14. Марчук Дмитро Аналіз сучасних алгоритмів виявлення і розпізнавання об'єктів з відеопотоку для систем управління паркуванням в реальному часі. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. № 3 (321). С. 17–23.
15. Bello S. A., Yu S., Wang C., Adam J. M., Li J. Review: Deep Learning on 3D Point Clouds. *Remote Sens*. 2020. №12. P. 1729. <https://doi.org/10.3390/rs12111729>
16. Elango, A.; Landry, R.J. XAI GNSS—A Comprehensive Study on Signal Quality Assessment of GNSS Disruptions Using Explainable AI Technique. *Sensors* 2024. № 24. P. 8039. <https://doi.org/10.3390/s24248039>
17. Aljamal M. A., Abdelghaffar H. M., Rakha H.A. Developing a Neural-Kalman Filtering Approach for Estimating Traffic Stream Density Using Probe Vehicle Data. *Sensors*. 2019. №19. P. 4325. <https://doi.org/10.3390/s19194325>
18. Shi J., Pan Z., Jiang L., Zhai X. An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT, *Advanced Engineering Informatics*, 2023. Volume 57. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102114>
-

References

1. Bill, R., Blankenbach, J., Breunig, M., Haunert, J. H., & Heipke, C. (2022). Geospatial information research: State of the art, case studies and future perspectives.

- J. Photogramm. Remote Sens. Geoinform. Sci., 90(4), 349–389. <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00217-9>
2. Rudewicz, J. (2024). Theoretical insights into artificial intelligence applications in human geography and spatial management (GeoAI). *European Research Studies Journal*, 27(4), 973–984.
 3. Tuia, D., Roscher, R., & Jacobs, N. (2021). Towards a collective agenda on AI for Earth science data analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(2), 88–104. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2020.3043504>
 4. Artemov, V., Movchan, T., Bakhchevan, E., & Danko, T. (2020). Pryntsypy tsyfrovoy transformatsii i vprovadzhenia yii v heodezii ta zemleustrii [Principles of digital transformation and its implementation in geodesy and land management]. *Ahrarnyi visnyk Prychornomoria*, 96, 129–138.
 5. Maksymenko, M. A., & Bondar, A. V. (2025). Vykorystannia HIS u inzhenerno-heodezychnykh vyshukuvanniakh pry proektuvanni dorih [Use of GIS in engineering and geodetic surveys for road design]. *Suchasni tekhnologii, materialy i konstrukttsii v budivnytstvi*, 38(1), 129–135. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-1-129-135>.
 6. Stupen, O. I., Prokopenko, N. I., & Shevchuk, S. M. (2025). Tsyfrova transformatsiia systemy zemleustroi: avtomatyzatsiia upravlinskykh protsesiv u sferi vykorystannia ta okhorony zemelnykh resursiv [Digital transformation of the land management system: automation of management processes in the field of land use and protection]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 212, 172–184. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296>
 7. Braslavskaya, O. V. (2025). HIS-tekhnologii ta dystantsiine zonduvannia u monitorynhu zmin zemlekorystuvannia [GIS technologies and remote sensing in monitoring land use changes]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 89, 472–487. <https://doi.org/10.32347/2076-815X.2025.89.472-487>
 8. Borovyi, V. O., Braslavskaya, O. V., & Rozhi, T. A. (2025). Intehratsiia analogovoho ta tsyfrovoho znimannia v systemakh zemleustroi: novi mozhlyvosti dlia heodezychnykh doslidzhen [Integration of analog and digital imaging in land management systems: new opportunities for geodetic research]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho*, 212, 195–207. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336377>
 9. Lazorenko, N. Yu. (2024). Doslidzhenia zastosuvannia shtuchnoho intelektu (GeoAI) dlia zavdan topohrafichnoho kartohrafuvannia [Study of artificial intelligence (GeoAI) application for topographic mapping tasks]. *Prostorovi rozvytok*, 8, 430–443. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.430-443>
 10. Makedon, V. V., & Bailova, O. O. (2023). Planuvannia i orhanizatsiia vprovadzhenia tsyfrovyykh tekhnolohii v diialnist promyslovykh pidpriemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Seriya "Ekonomichni nauky"*, 47, 16–26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>
 11. Tuia, D., Roscher, R., & Wegner, J. D. (2021). Toward a collective agenda on AI for Earth science data analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 10.
 12. Hochmair, H. H., Juhász, L., & Li, H. (2025). Advancing AI-driven geospatial analysis and data generation: Methods, applications and future directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(2), 56. <https://doi.org/10.3390/ijgi14020056>
 13. Reiterer, A., & Egly, U. (2010). Application of artificial intelligence in geodesy: A review of theoretical foundations and prac-

- tical examples. *Journal of Applied Geodesy*, 4, 201–217. <https://doi.org/10.1515/JAG.2010.020>
14. Marchuk, D. (2023). Analiz suchasnykh alhorytmiv vyivlennia i rozpoznavannia ob'ektiv z videopotoku dlia system upravlinnia parkuvanniam v realnomu chasi [Analysis of modern algorithms for object detection and recognition from video streams for real-time parking management systems]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 3(321), 17–23.
15. Bello, S. A., Yu, S., Wang, C., Adam, J. M., & Li, J. (2020). Review: Deep learning on 3D point clouds. *Remote Sensing*, 12, 1729. <https://doi.org/10.3390/rs12111729>
16. Elango, A., & Landry, R. J. (2024). XAI GNSS—A comprehensive study on signal quality assessment of GNSS disruptions using explainable AI technique. *Sensors*, 24, 8039. <https://doi.org/10.3390/s24248039>
17. Aljamal, M. A., Abdelghaffar, H. M., & Rakha, H. A. (2019). Developing a neural–Kalman filtering approach for estimating traffic stream density using probe vehicle data. *Sensors*, 19, 4325. <https://doi.org/10.3390/s19194325>
18. Shi, J., Pan, Z., Jiang, L., & Zhai, X. (2023). An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT. *Advanced Engineering Informatics*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102114>
-

Dorozhko Ye., Udovenko I.

INTELLIGENT TECHNOLOGIES IN ELECTRONIC GEODETIC SYSTEMS FOR PUBLIC SPATIAL MANAGEMENT: EVOLUTION FROM AUTOMATION TO DIGITAL ETHICAL STANDARDS

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 4'25: 117-129.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2025.02.09>

Abstract. The article is devoted to the intellectualization of electronic geodetic instruments (EGI) and the development of conceptual foundations for integrating artificial intelligence (AI) technologies into the geoinformation environment (GIS) to enhance the efficiency of spatial management systems. The study presents a developed architectural model of an intelligent spatial management system, which includes the interaction of electronic instruments, sensor modules, GIS platforms, and analytical AI services. The proposed concept of EGI intellectualization is based on three main vectors: autonomy of the measurement process (through machine learning, ML, for object recognition and self-diagnostics), adaptability to environmental conditions (via environmental impact correction and noise reduction), and integrativity with GIS. The research describes the use of AI methods, including deep neural networks (YOLO, Mask R-CNN, U-Net, Point-Net) for automatic detection and classification of objects in images and point clouds, as well as for real-time evaluation and correction of GNSS errors using neuro-Kalman filters. The practical directions of model implementation include automated monitoring of engineering structure deformations and intelligent UAV data processing for updating topographic maps. According to the findings, the phased integration of AI transforms EGI into intelligent sensors capable of autonomously assessing data quality and interacting with GIS, thereby providing a reliable foundation for smart cities and sustainable territorial development.

Keywords: intellectualization, artificial intelligence (AI), electronic geodetic instruments (EGI), GIS environment, spatial management systems, object detection, GNSS correction