

---

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕВОЛЮЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ: КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОГО УПРАВЛІННЯ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

---

**О.С. МАЛАЩУК,**

*кандидат економічних наук, доцент*

*E-mail: osmalashcuk@gmail.com*

*Одеський державний аграрний університет*

**Т.В. МОВЧАН,**

*кандидат економічних наук, доцент*

*E-mail: mov4an.tata@gmail.com*

*Одеський державний аграрний університет*

**Т.А. РОЖІ,**

*викладач*

*E-mail: tomas.rozhi.94@gmail.com*

*Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини*

**Анотація.** досліджує питання інтелектуалізації електронних геодезичних інструментів у контексті систем публічного менеджменту, акцентуючи трансформацію від автоматизованих процедур до адаптивних самонавчальних технологічних рішень з інтеграцією принципів цифрової етики. Реалізовано алгоритмічний аналіз із залученням розширеного фільтра Калмана (EKF) та рекурентних нейромережових архітектур довгої короткочасної пам'яті (LSTM) для адаптивної фільтрації інформаційних потоків, а також методів геопросторової статистики та ГІС-візуалізації для верифікації координатної консистентності. Отримані наукові результати свідчать, що інтелектуалізація детермінує трансформацію до когнітивних систем із сенсорною інтеграцією (GNSS, IMU, EDM), досягаючи міліметрової точності через застосування алгоритмів штучного інтелекту, зокрема EKF та LSTM, для прогностичного моделювання похибок та автокорекції. Встановлено, що хмарна інфраструктура та інтероперабельність із ГІС-платформами (ArcGIS, QGIS) формують уніфіковане цифрове середовище з механізмами валідації даних, що підвищує метрологічну стабільність та етичну підзвітність систем.

Практична значущість дослідження визначається вдосконаленням систем публічного управління, зокрема урбаністичного планування, земельно-кадастро-

вого обліку та інфраструктурного моніторингу, де інтелектуалізовані прилади забезпечують оновлення даних у режимі реального часу та превентивне управління ризиками. Дослідження сприяє підвищенню транспарентності державних реєстрів через цифрові паспорти вимірювань, редукуючи похибки та юридичні колізії в геоінформаційному середовищі. Перспективи подальших наукових розвідок передбачають розробку етичних стандартів для штучного інтелекту в геодезії та інтеграцію з технологіями Інтернету речей (IoT) для створення глобальних мереж моніторингу.

**Ключові слова:** інтелектуалізація, геодезичні прилади, сенсорна інтеграція, штучний інтелект, геоінформаційні системи, публічне просторове управління.

---

### **Постановка проблеми**

Інтелектуалізація електронних геодезичних приладів становить пріоритетний вектор еволюції сучасної геодезичної науки, відображаючи глобальну тенденцію трансформації від автоматизованих вимірювальних процесів до розробки адаптивних, самонавчальних і етично збалансованих технологічних рішень. У межах цифрової трансформації системи публічного просторового управління в Україні впровадження інтелектуальних тахеометричних комплексів, глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) та лазерно-сканувальних пристроїв у державні геоінформаційні інфраструктури формує фундамент для створення уніфікованого цифрового середовища достовірності, де кожна координатна позиція має верифіковане походження, а кожен вимірювальний акт – метрологічну валідність і юридичну релевантність. Науково-практична значущість дослідження обумовлена необхідністю підвищення точності, транспарентності та репродуктивності просторових даних, що застосовуються в урбаністичному плануванні, земельно-кадастровому обліку, інфраструктурному моніторингу та екологічному спостереженні.

### **Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій**

У науковому дискурсі спостерігається чітка тенденція до конвергенції електронних геодезичних технологій із методологією штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорної інтеграції. Наукові розвідки від Коваленко Л. [2], Войчік М. та ін. [16] акцентують трансформацію від традиційних автоматизованих інструментів до когнітивних систем, спроможних автономно адаптувати параметри вимірювань та реалізовувати автокалібрування в режимі реального часу. У публікаціях Батракова А. та ін. [1], Стефанова А. [15] розкрито потенціал цифрових геодезичних систем у забезпеченні просторової стабільності та прецизійності при зведенні інженерних об'єктів, а також у генерації цифрових моделей рельєфу на основі комплексних вимірювальних даних. Дослідники Ступень О. та ін. [6] наголошують на значущості впровадження геоінформаційних технологій у публічне управління, особливо в контексті кадастрового моніторингу та земельного упорядкування. У роботах Байрамі Лубіші Ф., Лубіштані М. [10], Сехнал М. [13] представлено підходи до автоматизації процесів геодезичного контролю через засто-

сування хмарних сервісів і модулів валідації інформації. Сукупність представлених наукових позицій засвідчує, що інтелектуалізація геодезичних приладів становить визначальний фактор оптимізації систем публічного просторового управління.

**Метою дослідження** є – визначення поточних процесів інтелектуалізації нових поколінь електронного геодезичного обладнання для використання оцінки стану геоінформаційного середовища, які спрямовані на формування цілісної технологічної, алгоритмічної та етичної моделі їхнього функціонування.

### ***Матеріали і методи дослідження***

Методологічний апарат дослідження базується на системному, структурно-функціональному та кіберфізичному концептуальних підходах до вивчення процесів інтелектуалізації електронних геодезичних інструментів у контексті публічного просторового менеджменту. У роботі реалізовано комплексне застосування теоретичних і емпіричних методів: аналітичного – для систематизації тенденцій еволюції сенсорних технологій і алгоритмів штучного інтелекту; моделювання – для конструювання архітектурних схем інтегрованих геодезичних систем із сенсорною інтеграцією; метрологічного експерименту, з метою оцінювання прецизійності та стійкості вимірювань у варіативних умовах зовнішнього середовища. Здійснено алгоритмічний аналіз для дослідження адаптивної фільтрації інформаційних потоків та прогностичного моделювання дрейфу сенсорів із застосуванням розширеного фільтра Калмана (ЕКФ) і рекурентних ней-

ронних мереж довгої короткочасної пам'яті (LSTM). Додатково залучено методи геопросторової статистики та ГІС-візуалізації для верифікації координатної узгодженості в процесі інтеграції вимірювальних пристроїв із геоінформаційними платформами.

Застосовано методи порівняльного аналізу для співставлення технічних характеристик різних поколінь електронних тахеометрів, цифрових нівелірів і GNSS-приймачів з метою визначення рівня їхньої адаптивності до умов автоматизованого управління. Використано інструментарій хмарної аналітики для моделювання процесів передавання та збереження геоданих у режимі реального часу, що дозволило оцінити ступінь інтеграційної сумісності між приладами та публічними геопорталами. Метод експертного оцінювання застосовано для визначення вагомості інтелектуальних модулів у підвищенні точності вимірювань і зниженні похибок позиціонування.

### ***Результати дослідження та їх обговорення***

Інтелектуалізація геодезичних приладів постає закономірним етапом у розвитку вимірювальних технологій, коли перехід від оптичних до електронних систем вже не задовольняє вимоги до точності, швидкості та когнітивної автономії процесів збору просторових даних, а тому виникає потреба у створенні сенсорних комплексів, здатних до самонавчання, контекстної адаптації та взаємодії з навколишнім середовищем у режимі реального часу. Сучасні електронні тахеометри, лазерні сканери та GNSS-приймачі втілюють нову парадигму геодезичного вимірювання, де

точність не лише стала функцією апаратної стабільності, але й результатом алгоритмічного мислення, яка формує систему прогнозування, коригування й аналізу похибок на рівні, раніше доступному лише людині [3, с. 19].

Сутність переходу полягає у впровадженні в архітектуру геодезичного приладу принципів штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорного ф'южну, які вміють не просто збирати інформацію, а інтерпретувати її у контексті складної багатофакторної реальності. Алгоритми глибинного навчання, зокрема нейронні мережі з розповсюдженням похибки, дедалі частіше використовуються для моделювання відхилень у роботі світлодалекомірів, прогнозування метеорологічних впливів або компенсації температурних деформацій. Сенсорний ф'южн, як технологічна платформа поєднання даних із різних джерел – лазерного далекоміра, IMU, GNSS-модуля та оптико-електронного трекара дає системі здатність до внутрішньої самокорекції, підвищуючи метрологічну стабільність навіть у нестабільних польових умовах. Сенсорна інтеграція у геодезичних приладах нового покоління має поліструктурний характер, через охоплення взаємодії лазерних далекомірів, GNSS-приймачів, оптико-електронних систем наведення, інерціальних модулів (IMU), а також MEMS-датчиків мікроскопічних коливань, температури та вібрацій [14, с. 149-150]. Кожен із цих сенсорів функціонує не ізольовано, а в межах системи сенсорного поєднання, де інформація з різних каналів поєднується для створення єдиного адаптивного вимірювального середовища.

Усередині архітектури інтелектуальних систем формується унікаль-

ний механізм динамічної узгодженості даних, коли кожен сенсор має ваговий коефіцієнт достовірності, який змінюється залежно від середовища вимірювання. Наприклад, у зоні слабого GNSS-сигналу вагомішими стають дані інерціальних сенсорів і оптичного трекара, тоді як у відкритій місцевості головну роль відіграє супутникова прив'язка. Ці технічні рішення реалізовані у системах Leica Nova та Trimble S-серії, стають основою досягнення точності в міліметровому діапазоні навіть за складних метеоумов або обмеженого доступу до базових станцій (табл. 1) [9].

Алгоритмічне забезпечення інтелектуальних геодезичних систем є центральною складовою, оскільки саме воно перетворює багатовимірний потік даних у структуровану модель простору. У таких приладах використовується комбінація алгоритмів адаптивної фільтрації, кореляційного аналізу, машинного навчання та нейромережних моделей прогнозування дрейфу. Наприклад, фільтр Калмана у розширеній формі (EKF) застосовується для синхронізації GNSS і IMU, і об'єднує інерціальні вимірювання з супутниковими координатами, що зменшує похибку положення до кількох міліметрів [16]. Нейронні мережі на базі LSTM (Long Short-Term Memory) на базі систем координат UTCN, використовуються для передбачення поведінки сенсорів у часі, особливо для компенсації дрейфу лазерного далекоміра чи температурних відхилень фотодетектора (рис. 1).

У приладах серії Topcon DS та Trimble S8/S9 реалізовано інтелектуальні алгоритми самоналаштування, які аналізують параметри довкілля та оптимізують режим вимірювання в реальному часі: при підвищеній во-

Таблиця 1. Сенсорна інтеграція та функціональні модулі інтелектуальних геодезичних систем

| Тип сенсора / модуля                | Основна функція                                                         | Технічні характеристики                                                 | Взаємодія в системі                                                     | Приклади застосування                                |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Лазерний далекомір (EDM)            | Вимірювання відстані до мішені за принципом фазового зсуву або імпульсу | Дальність: до 5 км на призму; точність: $\pm(1-2)$ мм                   | Синхронізується з GNSS і IMU для компенсації похибки нахилу             | Моніторинг деформацій споруд, зйомка кар'єрів        |
| GNSS-приймач (RTK/PPP)              | Визначення координат із глобальних супутникових систем                  | Точність RTK: 8–10 мм; час ініціалізації: $<5$ с                        | Забезпечує абсолютну геопросторову прив'язку системи                    | Геодинамічні спостереження, кадастрові роботи        |
| Оптико-електронна система наведення | Автоматичне визначення й супровід візирної цілі                         | Швидкість обертання: до 100°/с; точність наведення: 1"                  | Синхронізується з EDM і IMU; працює у замкненому контурі з автотрекером | Роботи моніторингу будівельних конструкцій           |
| IMU (інерціальний модуль)           | Визначення кутових прискорень, нахилів, вібрацій                        | Гіроскопи 3 осі, акселерометри 3 осі; частота 200 Гц                    | Виконує компенсацію коливань і динамічну стабілізацію                   | Автоматизована тахеометрія, роботи в русі            |
| MEMS-датчики мікроклімату           | Контроль температури, тиску, вологості                                  | Точність температури $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ; частота оновлення 1 Гц | Передає корекційні коефіцієнти для EDM і оптичних систем                | Автокорекція рефракції при далекомірних вимірюваннях |
| Камера / відеотрекер                | Візуальне розпізнавання мішені та навколишнього середовища              | Роздільна здатність 12–24 Мп; ШП-обробка кадру                          | Інтегрується з системами комп'ютерного зору; забезпечує автотрекінг     | 3D-сканування, фотограмметрія, VR-візуалізація       |

Джерело: [9, 14]

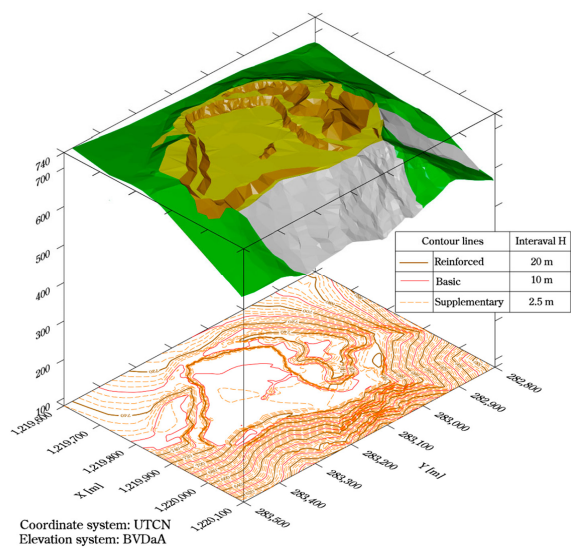


Рисунок 1 – Тривимірна модель рельєфу з ізолініями висот у системі координат UTM

Джерело: [16]

логості автоматично збільшується потужність лазера, а при інтенсивному сонячному випромінюванні активується режим спектральної компенсації.

Система ІІІ, вбудована в модуль керування, використовує машинні алгоритми на основі дерева рішень для класифікації умов спостереження, що дозволяє зменшити кількість некоректних спостережень. Вагому роль у функціонуванні інтелектуальних тахеометрів відіграють модулі самодіагностики та калібрування, які здійснюють постійний контроль геометричної стабільності приладу, виявляють аномальні коливання бази та компенсують їх без зупинки процесу вимірювання [4, с. 82]. У системах Leica Nova реалізовано трирівневу схему самодіагностики: на першому рівні проводиться перевірка внутрішнього датчика нахилу, на другому –

оцінка стабільності оптичної осі, а на третьому відбувається корекція електронного горизонту за даними ІМУ. Це дає можливість підтримувати метрологічну точність у межах  $\pm 1''$  без необхідності періодичної ручної перевірки (табл. 2).

Інтелектуалізація приладів неможлива без розвиненої хмарної інфраструктури, яка забезпечує збір, зберігання та обмін просторовими даними між польовими пристроями та центральними серверами. Геодезичні прилади нової генерації мають вбудовані модулі бездротового зв'язку (LTE/5G, Wi-Fi, Bluetooth 5.2), що дозволяють у режимі реального часу передавати результати спостережень на публічні геопортали, інтегровані з системами державного кадастру, BIM-моделями та платформами просторового планування. Через API-інтерфейси прилади

**Таблиця 2. Алгоритмічне забезпечення та штучний інтелект в інтелектуальних геодезичних системах просторового забезпечення**

| Компонент алгоритмічного забезпечення        | Основні функції                                     | Реалізовані технології                        | Результати/ефекти                                             | Приклади систем             |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Адаптивна фільтрація сигналів                | Згладжування шумів, компенсація похибок вимірювання | Розширений фільтр Калмана (EKF), Unscented KF | Підвищення точності позиціонування GNSS+IMU до 5 мм           | Trimble S9, Leica Nova TS60 |
| Машинне навчання для прогнозування дрейфу    | Виявлення систематичних змін у роботі сенсорів      | LSTM, Random Forest                           | Автоматична компенсація температурних і механічних зсувів     | Topcon DS, FOIF RTS005A     |
| Сенсорний ф'южн і кореляційна обробка        | Об'єднання даних з різних сенсорів                  | Bayesian Fusion, Cross-Correlation Model      | Усунення розбіжностей між EDM, GNSS і IMU                     | Leica GS18, Trimble SX10    |
| Нейромережевий контроль стабільності приладу | Визначення відхилень у роботі компонентів           | CNN, Decision Tree Ensemble                   | Самоналаштування геометрії системи в реальному часі           | FOIF RTS005, Leica Nova     |
| Автоматичне розпізнавання мішеней            | Ідентифікація цілей за візуальними ознаками         | Computer Vision, YOLOv8                       | Автоматичне наведення з точністю 0.5"                         | Trimble S8, Leica TS60      |
| Прогнозування умов спостереження             | Аналіз впливу довкілля на вимірювання               | Time Series Forecasting, Gaussian Process     | Автоматична оптимізація потужності лазера й параметрів оптики | Topcon DS, Trimble SX12     |

Джерело: [1, 7]

взаємодіють з хмарними сервісами типу Trimble Connect, Leica Infinity, Topcon MAGNET або FOIF Cloud, де здійснюється автоматичне архівування, побудова 3D-моделей і створення цифрових двійників місцевості [11, с.40].

У цих типах сервісів реалізовано механізми спільної роботи кількох операторів, коли результати вимірювань від різних приладів автоматично об'єднуються в єдину базу, а алгоритми просторової валідації перевіряють узгодженість координат, визначаючи ступінь довіри до кожної точки. Це створює основу для публічних систем моніторингу інфраструктури, де дані оновлюються в реальному часі без потреби у фізичній присутності фахівців на місці спостереження. Хмарні архітектури також відкривають можливості для впровадження цифрової етики у вимірювальних процесах: кожен запис вимірювання зберігається із цифровим підписом оператора, міткою часу та журналом калібрування приладу, що гарантує

відтворюваність і достовірність результатів [12]. У перспективі ці дані формуватимуть «етичні паспорти» геодезичних операцій, де кожна координата матиме історію своєї перевірки, корекції та використання [2].

У межах геоінформаційної взаємодії ключову роль відіграє сумісність між інтелектуальними тахеометрами, лазерними сканерами, безпілотними аеросистемами (UAV-GIS) і платформами обробки даних на кшталт ArcGIS, QGIS, MapInfo, Global Mapper або національних геопорталів. Завдяки підтримці відкритих форматів обміну: GeoJSON, WMS/WFS, GML, CityGML, LAS, коли забезпечується миттєве завантаження польових вимірювань до центральних репозиторіїв, де вони проходять автоматичну перевірку на узгодженість із існуючими кадастровими та топографічними базами [8, с. 101]. Особливістю інтелектуальних систем є те, що вони не лише передають геодані, а й супроводжують їх повним пакетом технічної інформації



**Рисунок 2. Фрагмент аерофотознімка з окресленою зоною геодезичного дослідження інфраструктурного об'єкту**

Джерело: [13]

ції – калібрувальними метаданими, історією зміни параметрів приладу, валідаційними звітами та цифровими підписами оператора (рис. 2).

Сучасні геоінформаційні системи ArcGIS Pro або QGIS із модулем QField уже підтримують пряме підключення до польових приладів Leica, Trimble або FOIF, що працюють у режимі RTK. При цьому координати, отримані приладом, синхронізуються із центральною базою через протоколи MQTT або REST API, що дозволяє не лише передавати дані, але й отримувати оновлення про зміни контурів земельних ділянок, транспортної інфраструктури чи геодинамічних процесів [5].

Кадастровий облік, який традиційно спирався на дискретні зйомки, у цифрову епоху поступово перетворюється на неперервний процес моніторингу, де кожен вимір має підтверджену трасу походження. Інтелектуальні геодезичні системи забезпечують автоматизовану трасованість даних через генерацію унікальних ідентифікаторів для кожного вимірювання, які зв'язуються з електронним підписом оператора, координатами GNSS, часом фіксації та версією приладного програмного забезпечення. У межах державних кадастрових реєстрів ці метадані інтегруються з електронними журналами вимірювань, що дозволяє в автоматичному режимі підтверджувати автентичність результатів і виключати можливість їх маніпуляцій.

Інтелектуальні прилади, об'єднані у мережі IoT, формують багатоточкові системи спостереження, у яких кожен сенсор передає дані про мікрозміщення об'єкта, температурні деформації чи вібраційні збурення. Об'єднані з геоінформаційною плат-

формою, ці дані автоматично аналізуються алгоритмами машинного навчання, які розпізнають аномальні зміни та попереджають про ризики руйнування або просідання ґрунтів. Для органів публічного управління це означає можливість переходу від реактивного до превентивного управління інфраструктурними ризиками, коли рішення приймаються на підставі безперервного просторового аналізу, а не постфактум.

З метою забезпечення відтворюваності та метрологічної узгодженості результатів в межах інтегрованих систем використовується принцип багаторівневої валідації даних, який передбачає автоматичну перевірку кожного вимірювання на рівні сенсора, приладу, геоінформаційної бази та державного реєстру. На першому рівні перевіряється внутрішня консистентність даних, як відповідність між виміряними координатами, кутами та відстанями. На другому рівні система порівнює дані з попередніми спостереженнями, фіксуючи відхилення понад допустимі нормативи [15]. На третьому рівні виконується верифікація із зовнішніми базами (наприклад, Державним земельним кадастром, де автоматичні алгоритми встановлюють відповідність контурів земельних ділянок та атрибутивних даних (табл. 3).

Однією з найскладніших і водночас найцінніших складових інтеграції є забезпечення інтеоперабельності між системами різних рівнів управління: територіальних громад та державного рівня. З погляду методології публічного управління, інтеграція інтелектуальних геодезичних приладів радикально змінює саму логіку прийняття управлінських рішень: якщо раніше аналітика формувалася на основі звітів і періодичних зйомок,

**Таблиця 3. Інтеграція інтелектуальних геодезичних приладів у системи публічного просторового управління (сформовано авторами)**

| Сфера застосування                  | Тип інтеграції                                                                  | Основні інструменти та технології                             | Алгоритмічні механізми                                                                          | Очікувані результати для публічного управління                                                      |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Просторове планування               | Інтеграція даних з приладів у ГІС-шари містобудівних моделей                    | ArcGIS Pro, QGIS, CityGML, BIM-інтерфейси                     | Просторове узгодження координат, аналіз топологічних конфліктів, симуляція транспортних потоків | Оперативне оновлення містобудівних документів, підвищення точності прогнозування розвитку територій |
| Кадастровий облік                   | Передача вимірювань із цифровим підписом у державні кадастрові бази             | GNSS-RTK + REST API інтеграція з ДЗК                          | Автоматичне створення метаданих, перевірка цифрових підписів, трасування вимірювань             | Зменшення кількості помилок у кадастрових записах, підвищення довіри до геоданих                    |
| Моніторинг інфраструктури           | Постійне спостереження за станом об'єктів через IoT-мережі                      | Trimble Monitoring, Leica GeoMoS, FOIF Cloud                  | Швидке виявлення, предиктивна аналітика, автоматичні сповіщення                                 | Превентивне управління ризиками руйнування, оптимізація ремонтних робіт                             |
| Екологічний моніторинг              | Інтеграція геоданих з приладів і сенсорів у системи спостереження за ландшафтом | UAV-GIS, супутникові знімки, OpenDataHub                      | Мультиспектральний аналіз, кореляція з кліматичними моделями                                    | Оцінка антропогенного впливу, підтримка рішень зі сталого землекористування                         |
| Публічна візуалізація та прозорість | Відкриті геопортали для громадян і органів місцевого самоврядування             | INSPIRE Geoportal, Національна геоінформаційна інфраструктура | API-доступ до шарів, контроль версій, цифрова сертифікація даних                                | Зростання прозорості управлінських процесів, громадський контроль просторових рішень                |
| Юридична та метрологічна валідація  | Перевірка даних у державних реєстрах на відповідність стандартам ISO 191xx      | Blockchain-трасування, сертифікація приладів                  | Багаторівнева верифікація, контроль калібрування                                                | Підвищення надійності просторових записів, зниження рівня технічних ризиків                         |

Сформовано авторами

то сьогодні управлінець працює з потоковими даними, що оновлюються щохвилини, дозволяючи застосовувати принципи «evidence-based policy» у реальному часі [3]. Це означає, що рішення про оновлення меж земельної ділянки, ремонт мосту або регулювання забудови можуть прийматися на основі даних, які зібрані приладами кілька хвилин тому, що принципово підвищує ефективність і відповідальність державного управління.

На завершення слід підкреслити, що комплексна інтеграція інтелек-

туалізованих геодезичних систем у структуру публічного просторового управління ініціює формування нової парадигми просторової верифікації, в межах якої кожна метрична одиниця, координатна величина та межова лінія набувають статусу цифрово валідованих елементів просторового знання. Така система не лише оптимізує якість управлінських рішень на основі просторових даних, а й забезпечує суспільну легітимність державних інформаційних реєстрів, створюючи методологічне підґрунтя для сталого

розвитку, де цифрові технології та геопросторові вимірювання функціонують як інтегрована система пізнання, верифікації та прогнозування.

### **Висновки і перспективи**

Визначено, що процес інтелектуалізації електронних геодезичних інструментів детермінує становлення нової техніко-методологічної концепції просторових вимірювань, в рамках якої прецизійність і валідність результатів обумовлюються не виключно технічними характеристиками апаратури, а також потенціалом системи до когнітивної трансформації та алгоритмічної автокорекції. Прогрес у сфері сенсорної інтеграції, що передбачає об'єднання супутникових приймачів GNSS, лазерних вимірювальних пристроїв, інерціальних навігаційних одиниць та оптико-електронних трактів, уможливорює автономне узгодження інформаційних потоків у режимі реального часу, що редукує вимірювальні відхилення навіть за несприятливих умов польових робіт.

Аргументовано, що алгоритмічний базис становить центральний компонент інтелектуалізованих геодезичних систем, оскільки він забезпечує інтеграцію сенсорної інформації в уніфіковану цифрову репрезентацію простору та реалізує прогностичне моделювання похибок, автоматичне калібрування і самоідентифікацію вимірювальних пристроїв. Застосування адаптивних обчислювальних методів: калманівської фільтрації, байєсівського оцінювання, рекурентних нейромережових архітектур типу LSTM, забезпечує досягнення міліметрової точності позиціонування, стабілізацію функціонування систем у режимі безперервного спостереження та еліміна-

цію впливу екзогенних чинників.

Обґрунтовано, що впровадження інтелектуалізованих геодезичних інструментів у системи публічного просторового менеджменту забезпечує формування інтегрованого інформаційного контуру, в межах якого геопросторові дані трансформуються в юридично релевантні, верифіковані та етично регульовані одиниці просторового знання. Через підключення вимірювальних комплексів до геоінформаційних платформ та хмарних сервісів реалізується автоматична простежуваність даних, їхня багаторівнева верифікація та синхронізація з державними кадастровими системами.

---

### **Список використаної літератури**

1. Батракова А. Г., Дорожко Є. В., Ємець В. А. Особливості побудови цифрової моделі рельєфу за результатами геодезичної зйомки місцевості. *Комунальне господарство міст*. 2021. Том 1. Випуск 161. С. 104-108. DOI: 10.33042/2522-1809-2021-1-161-104-108
2. Коваленко Л. О. Геодезичне забезпечення будівництва інженерних споруд. *Комунальне господарство міст. Серія: інформаційні технології та інженерія*. 2022. № 3 (170). С. 223-227. DOI: 10.33042/2522-1809-2022-3-170-223-227
3. 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
4. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2

- (59). С. 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
5. Рибіна О. І. Інтегрована модель ISLA як відповідь на виклики сучасної земельної політики України. Наукові записки Львівського університету бізнесу та права. *Серія економічна. Серія юридична*. 2025. Випуск 44. С. 416-423. DOI: 10.5281/zenodo.15532670
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. № 212. С. 172-184. DOI: 10.18664/1994-7852.212.2025.336296
7. Сухий П. О., Сабадаш В. І., Дарчук К. В. Сучасні електронні геодезичні прилади: практикум. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 288 с.
8. Тимченко С. І. Концепція цифровізації дорожньо-інфраструктурних проєктів в Україні: використання геоінформаційних технологій для підвищення ефективності управління. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 95-104. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.95-104>
9. Шевчук С. М., Домашенко Г. Т., Куришко Р. В. Геодезичний моніторинг при розробці комплексних планів просторового розвитку. *Географія та туризм*. 2024. № 31. С. 31-37. <https://doi.org/10.17721/2308-135X.2024.76.31-37>
10. Bajrami Lubishi F., Lubishtani M. Advancing geodesy education: Innovative pedagogical approaches and integration into STEM curricula. *STEM Education*. 2025. Vol. 5. No. 2. P. 229-249. DOI: 10.3934/steme.2025012
11. Kukhar M., Myronenko M., Kobzan S., Masliy L. Analysis of the main aspects of modern tools for solving geodetic problems. *Sworld-Us Conference Proceedings*. 2023. Vol. 1, No. usc16-01. Pp. 37-42. DOI: 10.30888/2709-2267.2023-16-01-043.
12. 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. P. 165-179. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296>
13. Sehna M. The visibility challenge of geodesy. *GIM International*. 2025. Vol. 39. No. 4. P. 20-21.
14. Stadnikov V., Likhva N., Miroshnichenko N., Kostyuk V., Dorozhko Y. Exploring Geoinformation Technology Potential for Automating the Development and Maintenance of Digital Topographic Maps. *African Journal of Applied Research*. 2025. Vol. 11. No. 1. pp. 146-156. DOI: 10.26437/ajar.v11i1.
15. Stefanova A. Geodesy 4.0: Geodesy transformation via new technologies. XII International Scientific Conference on Architecture and Civil Engineering (ArCivE 2025), 31 May 2025, Varna, Bulgaria. Vol. 5. P. 311-317.
16. Wójcik M., Dmochowska-Dudek K., Tobiasz-Lis P. Boosting the Potential for GeoDesign: Digitalisation of the System of Spatial Planning as a Trigger for Smart Rural Development. *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 13. article 3895. <https://doi.org/10.3390/en14133895>

## References

1. Batrakova, A. H., Dorozhko, Ye. V., & Yemets, V. A. (2021). Osoblyvosti pobudovy tsyfrovoi modeli reliefu za rezul'tatamy heodezychnoi ziomky mistsevastsi [Features of constructing a digital terrain model based on the results of geodetic surveying of the area]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 1(161), 104–108. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-104-108>

2. Kovalenko, L. O. (2022). Heodezychne zabezpechennia budivnytstva inzhenernykh sporud [Geodetic support for the construction of engineering structures]. *Komunalne hospodarstvo mist. Serii: informatsiini tekhnologii ta inzheneriia*, 3(170), 223–227. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-223-227>
3. Makedon, V. V., & Bailova, O. O. (2023). Planuvannia i orhanizatsiia vprovadzhenia tsyfrovykh tekhnologii v diialnist promyslovykh pidpriemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Serii "Ekonomichni nauky"*, 47, 16–26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>
4. Makedon, V. V., Kholod, O. H., & Yarmolenko, L. I. (2023). Model otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnologichnykh pidpriemstv na zasadakh formuvannia kliuchovykh kompetentsii [Model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises based on the formation of key competences]. *Akademichniy ohliad*, 2(59), 75–89. <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5>
5. Rybina, O. I. (2025). Intehrovana model ISLA yak vidpovid na vyklyky suchasnoi zemelnoi polityky Ukrainy [Integrated ISLA model as a response to the challenges of modern land policy of Ukraine]. *Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. Serii ekonomichna. Serii yurydychna*, 44, 416–423. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15532670>
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. Sukhyi, P. O., Sabadash, V. I., & Darchuk, K. V. (2021). Suchasni elektronni heodezychni prylady: praktykum [Modern electronic geodetic instruments: Practicum]. Chernivtsi: Yurii Fedkovych Chernivtsi National University.
8. Tymchenko, S. I. (2024). Kontseptsiiia tsyfrovizatsii dorozhnio-infrastrukturnykh proiektiv v Ukraini: vykorystannia heoinformatsiinykh tekhnologii dlia pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia [The concept of digitalization of road infrastructure projects in Ukraine: using geoinformation technologies to improve management efficiency]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 60, 95–104. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.95-104>
9. Shevchuk, S. M., Domashenko, H. T., & Kuryshko, R. V. (2024). Heodezychnyi monitorynh pry rozrobtsi kompleksnykh planiv prostorovoho rozvytku [Geodetic monitoring in the development of integrated spatial development plans]. *Heohrafiia ta turyzm*, 31, 31–37. <https://doi.org/10.17721/2308-135X.2024.76.31-37>
10. Bajrami Lubishi, F., & Lubishtani, M. (2025). Advancing geodesy education: Innovative pedagogical approaches and integration into STEM curricula. *STEM Education*, 5(2), 229–249. <https://doi.org/10.3934/steme.2025012>
11. Kukhar, M., Myronenko, M., Kobzan, S., & Masliy, L. (2023). Analysis of the main aspects of modern tools for solving geodetic problems. *Sworl-US Conference Proceedings*, 1(usc16-01), 37–42. <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2023-16-01-043>
12. Makedon, V., Myachin, V., Alosyna, 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://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025\\_05/2025\\_05\\_09.pdf](https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf)
13. Sehna, M. (2025). The visibility challenge of geodesy. *GIM International*, 39(4), 20–21. <https://www.gim-international.com/content/article/the-visibility-challenge-of-geodesy>
  14. Stadnikov, V., Likhva, N., Miroshnichenko, N., Kostiuk, V., & Dorozhko, Y. (2025). Exploring Geoinformation Technology Potential for Automating the Development and Maintenance of Digital Topographic Maps. *African Journal of Applied Research*, 11(1), 146-156. <https://doi.org/10.26437/ajar.v11i1>
  15. Stefanova, A. (2025). Geodesy 4.0: Geodesy transformation via new technologies. Proceedings of the XII International Scientific Conference on Architecture and Civil Engineering (ArCivE 2025), Varna, Bulgaria, Vol. 5, 311-317.
  16. Wójcik, M., Dmochowska-Dudek, K., & Tobiasz-Lis, P. (2021). Boosting the potential for GeoDesign: Digitalisation of the system of spatial planning as a trigger for smart rural development. *Energies*, 14(13), 3895. <https://doi.org/10.3390/en14133895>

**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 4'25: 95-107.  
<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2025.04.07>

**Abstract.** The article explores the intellectualization of electronic geodetic instruments within public spatial management systems, emphasizing the transformation from automated procedures to adaptive self-learning technological solutions integrating the principles of digital ethics. Algorithmic analysis using the Extended Kalman Filter (EKF) and Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural networks was applied for adaptive filtering of information flows, while geospatial statistics and GIS visualization methods were used to verify coordinate consistency. The results show that intellectualization determines the transformation toward cognitive systems with sensor integration (GNSS, IMU, EDM), achieving millimeter accuracy through AI algorithms such as EKF and LSTM for predictive error modeling and self-correction. It has been established that cloud infrastructure and interoperability with GIS platforms (ArcGIS, QGIS) form a unified digital environment with data validation mechanisms, enhancing metrological stability and ethical accountability.

The practical significance lies in improving public management systems, including urban planning, cadastral accounting, and infrastructure monitoring, where intelligent instruments enable real-time data updates and preventive risk management. The study contributes to increasing transparency of state registers through digital measurement passports, reducing errors and legal inconsistencies in spatial governance. Prospects for further research include the development of ethical standards for AI in geodesy and integration with the Internet of Things (IoT) technologies to create global monitoring networks.

**Keywords:** intellectualization, geodetic instruments, sensor integration, artificial intelligence, geographic information systems, public spatial management.