
ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ЗЕМЕЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ В УКРАЇНІ: ВІД ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ

Д.О. КОШЕЛЬ,

аспірант кафедри землевпорядного проектування

Email: d.koshel@nubip.edu.ua

ORCID: 0009-0006-2161-2374

А.О. КОШЕЛЬ,

доктор економічних наук, професор

Email: koshel_a@nubip.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9032-1622

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. У статті досліджується еволюція інструментів цифровізації управління земельними ресурсами в Україні крізь призму зміни технологічних парадигм. Виокремлено три послідовні покоління цифрових рішень: перше – засноване на геоінформаційних системах та цифровому картографуванні ґрунтів; друге – на методах машинного навчання та концепції цифрових двійників; третє – на технологіях генеративного штучного інтелекту та агентів на основі великих мовних моделей (LLM). Проаналізовано стан вітчизняної нормативно-правової бази, інформаційної інфраструктури та кадрового потенціалу у сфері земельного кадастру. Показано, що перехід до третього покоління є не лише кількісним покращенням окремих показників, а якісним переосмисленням ролі людини у процесі просторового аналізу: аналітик переходить від функції оператора до функції постановника завдання, тоді як агент самостійно планує та виконує аналітичний процес. За уніфікованим набором параметрів складено порівняльну характеристику трьох поколінь технологій та сформовано матрицю бар'єрів і можливостей за п'ятьма напрямками — дані, кадри, нормативне регулювання, фінансування та кібербезпека. Обґрунтовано передумови траєкторії технологічного стрибка (leapfrogging) у контексті повоєнної відбудови та євроінтеграції, а також імператив дотримання принципу «людина в контурі» (human-in-the-loop) для юридично значущих кадастрових даних.

Ключові слова: цифрова трансформація, управління земельними ресурсами, геоінформаційні системи, машинне навчання, LLM-агенти, земельний кадастр, штучний інтелект, Autonomous GIS.

Актуальність

Земельний фонд України налічує понад 60 млн гектарів – один із найбільших показників серед країн Європи. Водночас система управління цим ресурсом тривалий час характеризувалася фрагментованістю інформаційних потоків, дублюванням реєстрів та обмеженими аналітичними можливостями у прийнятті обґрунтованих рішень [1]. Накопичення великих обсягів геопросторової інформації без належних механізмів її обробки та інтерпретації не лише не підвищує якість управлінських рішень, а й породжує нові організаційні ризики.

Останнє десятиліття ознаменувалося суттєвим розширенням технологічного арсеналу земельного менеджменту: від запровадження Державного земельного кадастру в електронній формі до розбудови національної інфраструктури геопросторових даних [12] та впровадження дистанційного зондування Землі й методів машинного навчання для моніторингу сільськогосподарських угідь [3]. Проте на тлі глобального прискорення розвитку генеративного штучного інтелекту вітчизняна практика лише починає осмислювати можливості нового технологічного покоління.

Актуальність теми посилюється контекстом повоєнної відбудови, сукупні потреби якої на відновлення та реконструкцію станом на кінець 2025 року оцінено майже у 588 млрд дол. США [16]: значна частина земельного фонду на деокупованих територіях потребує оперативної інвентаризації за умов пошкодженої або відсутньої первинної документації. Саме тут потенціал LLM-агентів – здатних працювати з неповними, суперечливими

та різноформатними даними – набуває особливого практичного значення [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перше покоління: ГІС та цифрове картографування ґрунтів.

Становлення цифрової епохи у земельному менеджменті пов'язане передусім із розвитком геоінформаційних систем та методології цифрового картографування ґрунтів (Digital Soil Mapping, DSM). Ця парадигма, теоретичне підґрунтя якої закладено у роботах Minasny та McBratney [5], базувалася на переведенні польових обстежень у цифрові формати та побудові статистичних моделей просторового розподілу властивостей ґрунту. Принциповим досягненням цього етапу стала формалізація залежностей між характеристиками ґрунту та факторами ґрунтоутворення через кількісні моделі, що дозволило здійснювати просторове прогнозування на основі обмеженої вибірки точкових спостережень.

В Україні перше покоління цифрових технологій матеріалізувалося у запровадженні Державного земельного кадастру (ДЗК) в електронній формі, розбудові національної інфраструктури геопросторових даних та поступовій автоматизації землепорядних процедур. Таратула [1] у фундаментальному дослідженні з еколого-економічних засад інформаційного забезпечення управління земельними ресурсами довела, що ефективна земельно-інформаційна система є не статичним сховищем даних, а динамічним процесом організації цілеспрямованих інформаційних потоків. Водночас авторка констатувала системну проблему:

інформаційні підсистеми земельного кадастру, моніторингу та землеустрою функціонували ізольовано, що унеможливлювало їх синергетичний ефект.

Полтавець [2], досліджуючи механізми управління земельними ресурсами аграрних підприємств, зафіксував іншу суттєву проблему першого покоління – розрив між якістю українських ґрунтів (об’єктивно вищою, ніж у більшості країн ЄС) та продуктивністю землекористування. На думку автора, технологічна відсталість виробничих процесів, а не природні умови, є головним чинником, що стримує реалізацію агровиробничого потенціалу держави. Цей висновок підкреслює, що інформаційно-технологічний розрив має прямі еколого-економічні наслідки.

Друге покоління: машинне навчання та цифрові двійники.

Якісний стрибок у можливостях аналізу геопросторових даних відбувся з конвергенцією методів машинного навчання, хмарних обчислень та концепції цифрових двійників. На рівні концептуальної рамки Nasirahmadi та Hensel [6] запропонували модель застосування технології Digital Twin в аграрному секторі, де цифровий двійник постає динамічною віртуальною репрезентацією реального об’єкта, що безперервно актуалізується завдяки потокам даних від сенсорів та супутників. Ця концепція принципово змінила підхід до моніторингу земель – від дискретних знімків до неперервного спостереження.

Практичну результативність другого покоління підтверджують конкретні кейси. Ramsewak та співавт. [8] на прикладі цифрового двійника острова Тобаго продемонстрували, що

класифікація земельного покриття за алгоритмом Random Forest на основі мультиспектральних супутникових знімків, інтегрованих із LiDAR-моделлю рельєфу, досягає точності 97% – показник, недосяжний методами першого покоління. Scandurra та співавт. [9] показали ефективність інтеграції BIM, ГІС та бізнес-аналітики (Business Intelligence) для управління публічними активами нерухомості, де ключовою перевагою стала можливість формування інтерактивних KPI-дашбордів для підтримки управлінських рішень.

В Україні другий технологічний рівень знайшов відображення у роботах Інституту землекористування НААН [3]. Дослідники розробили алгоритми обробки знімків Sentinel-1 та Sentinel-2 [15] на платформі Google Earth Engine для ідентифікації посівів сільськогосподарських культур по всій території країни, включно з тимчасово окупованими районами. Важливим практичним результатом стало визначення скорочення посівних площ на підконтрольних територіях у 2022 році на 20,8% – дані, отримані виключно дистанційними методами без можливості польового доступу. Цей досвід набув особливого значення саме в умовах збройного конфлікту.

На порозі третього покоління: LLM-агенти та Autonomous GIS.

Поява великих мовних моделей (Large Language Models, LLM) відкрила принципово новий вимір у геопросторовому аналізі. Якщо перше і друге покоління технологій автоматизували виконання заздалегідь запрограмованих операцій, то LLM-агенти здатні самостійно інтерпретувати задачу, сформульовану природною мовою, планувати послідовність дій,

генерувати програмний код та верифікувати результати. Лі та співавт. [7] у програмній праці концептуалізували цю парадигму як Autonomous GIS – геоінформаційні системи нового покоління, де LLM відіграє роль ядра прийняття рішень, а не лише інструменту обробки даних.

Принципова відмінність третього покоління від попередніх полягає у зміні архітектури взаємодії людини та системи. У першому та другому поколіннях людина-аналітик залишається у центрі процесу: вона конфігурує алгоритми, інтерпретує результати, приймає рішення. У третьому поколінні людина переходить від ролі оператора до ролі постановника завдання – достатньо сформулювати аналітичну проблему, а агент самостійно знаходить дані, обирає методи, виконує розрахунки та представляє результати. Ця інверсія знижує кваліфікаційний поріг доступу до складного просторового аналізу, що має стратегічне значення для країн із дефіцитом ГІС-фахівців.

Маланчук, Музика, Кравчук та Лук'янченко [4], аналізуючи перспективи впровадження ІІІ в кадастрових та землепорядних процесах, зафіксували неоднозначну картину: попри визнання значного потенціалу нових технологій, практичне їх застосування стримується недостатньою стандартизацією даних, відсутністю адаптованого законодавства та браком фахівців, здатних ефективно інтегрувати ІІІ у виробничі процеси. Дослідники наголошують, що ключовою умовою успішного впровадження є не лише технологічна готовність, а й організаційна та правова зрілість інституцій.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є систематизація еволюції цифрових інструментів

управління земельними ресурсами в Україні та обґрунтування передумов переходу до нового технологічного покоління на основі агентних систем штучного інтелекту.

Завдання дослідження: охарактеризувати три покоління цифрових технологій у земельному менеджменті; проаналізувати стан вітчизняного інформаційно-аналітичного забезпечення управління земельними ресурсами; ідентифікувати бар'єри та можливості впровадження LLM-агентів у вітчизняну практику; сформулювати рекомендації щодо пріоритетних напрямів цифрової трансформації з урахуванням контексту відбудови.

Матеріали і методи дослідження

Дослідження побудоване на поєднанні кількох методологічних підходів. Основу складає системний аналіз, що дозволяє розглядати управління земельними ресурсами як цілісну соціо-технічну систему, компоненти якої взаємопов'язані та взаємозалежні. Ретроспективний аналіз застосовується для реконструкції послідовності технологічних змін та виявлення закономірностей переходу між поколіннями цифрових рішень.

Порівняльний аналіз використовується для зіставлення характеристик трьох технологічних поколінь за уніфікованим набором параметрів: ключова технологія, роль людини, кваліфікаційні вимоги, продуктивність та масштабованість. Аналіз вітчизняного контексту ґрунтується на критичному опрацюванні результатів наукових досліджень НУБіП, НААН, ЛНАУ та Сумського НАУ, а також нормативних документів Держгеокадастру та Мінцифри.

Для структурованої оцінки перспектив впровадження розроблено авторську матрицю бар'єрів та можливостей за п'ятьма напрямками: дані, кадри, нормативна база, фінансування та безпека. Така структура дозволяє ідентифікувати не лише окремі перешкоди, а й взаємозв'язки між ними та системні способи їх подолання.

Результати дослідження

Порівняльна характеристика технологічних поколінь.

На основі систематизації наукових даних складено порівняльну характеристику трьох поколінь цифрових технологій управління земельними ресурсами (табл. 1). Зазначені часові показники для третього покоління відповідають попереднім оцінкам на основі опублікованих даних щодо продуктивності LLM-агентів [7] та є предметом подальшої верифікації.

Характерною особливістю переходів між поколіннями є їх принципово

різна природа. Зміна від першого до другого покоління є еволюційною: автоматизується більше операцій, зростає точність, розширюється масштаб – але людина залишається центральною ланкою аналітичного процесу. Перехід до третього покоління є революційним за своєю суттю, оскільки змінюється сама логіка взаємодії: система отримує здатність до автономного цілепокладання в межах поставленої задачі.

Стан вітчизняного інформаційно-аналітичного забезпечення.

Аналіз наявних досліджень дозволяє констатувати, що вітчизняна система управління земельними ресурсами на сьогодні залишається переважно на межі першого та другого технологічних поколінь. ДЗК функціонує в електронній формі та забезпечує базовий рівень цифровізації кадастрових даних. Окремі установи, зокрема дослідні господарства НААН, успішно застосовують методи машинного навчання та дистанційно-

1. Порівняльна характеристика поколінь цифрових технологій управління земельними ресурсами

Ознака порівняння	Перше покоління (ГІС/DSM)	Друге покоління (ML/Digital Twin)	Третє покоління (LLM-агенти/ Autonomous GIS)
Ключова технологія	Статистичні моделі + ГІС	Машинне навчання, IoT, хмарні платформи	Генеративний ШІ, LLM, агентні системи
Роль людини	Центральна – збір, аналіз, рішення	Аналіз + верифікація	Постановка завдання + верифікація
Кваліфікація виконавця	Магістр ГІС + польовий досвід	ГІС + ML/Python	Доменна експертиза + prompt engineering
Швидкість аналізу (LULC 100 км²)	120–200 год	24–60 год	2–8 год*
Масштабованість	Низька (1–2 аналізи/міс/ГТЕ)	Середня (4–10)	Висока (20–60*)
Адаптивність до неповних даних	Висока (експертна)	Низька	Потенційно висока*
Приклади застосування в Україні	ДЗК, ГІС-землеустрій	Sentinel-моніторинг, Google Earth Engine [3]	Перебуває на стадії впровадження [4]

* – попередні оцінки на основі опублікованих даних щодо продуктивності LLM-агентів; підлягають верифікації в пілотних проєктах.

2. Матриця бар'єрів та можливостей впровадження LLM-агентів в управління земельними ресурсами України

Сфера	Ідентифіковані бар'єри	Можливості подолання
Дані	Неоднорідність форматів кадастрових реєстрів, часткова оцифровка архівних матеріалів	Пріоритизація API-інтеграцій ДЗК; залучення волонтерських ініціатив картографування
Кадри	Дефіцит фахівців з LLM-інтеграції у земельних органах	Цільові освітні програми; партнерство НУБіП із IT-сектором
Нормативна база	Відсутність регулювання III-генераційних кадастрових даних	Концепція розвитку III в Україні [14] як рамка; адаптація досвіду ЄС (директива INSPIRE [13])
Фінансування	Пріоритет оборонних видатків; обмежений IT-бюджет Держгеокадастру	Програми відбудови ЄС/Світового банку; цільові грантові механізми (USAID Land та ін.)
Безпека даних	Ризики використання зовнішніх API для чутливих геопросторових даних	Розробка національної LLM «Сяйво»; edge-розгортання моделей сімейства Gemma (офлайн)

го зондування Землі для моніторингу сільськогосподарських угідь [3].

Водночас дослідники фіксують низку системних проблем, що стримують подальший технологічний прогрес. Земельно-інформаційні підсистеми (кадастр, моніторинг, землеустрій, статистичний облік) функціонують без належного горизонтального обміну даними. Відсутній єдиний стандарт метаданих, що унеможливорює автоматизовану інтеграцію різнорідних джерел геопросторової інформації, на відміну від гармонізованого підходу ЄС, запровадженого директивою INSPIRE [13]. Кадровий потенціал органів земельного управління орієнтований переважно на обслуговування наявних систем, а не на освоєння нових аналітичних інструментів [4].

Повномасштабне вторгнення додало до наведеного переліку нові критичні виклики. За оцінками Інституту землекористування НААН [3], скорочення посівних площ у 2022 році зафіксовано переважно дистанційними методами, оскільки польовий доступ на значних територіях неможливий. Частина кадастрових архівів на тимчасово окупованих та деокупованих

територіях пошкоджена або втрачена. Завдання відновлення земельної документації у постконфліктний період вимагатиме нових підходів, що виходять за межі можливостей першого та другого технологічних поколінь.

Бар'єри та можливості впровадження LLM-агентів.

Систематизацію основних перешкод та шляхів їх подолання за п'ятьма напрямками наведено у матриці (табл. 2).

Наведений аналіз свідчить про те, що жоден із бар'єрів не є нездоланим у середньостроковій перспективі. Ключовою умовою є системна координація між органами земельного управління, освітніми установами, IT-сектором та міжнародними партнерами з відбудови. Особливо перспективним видається включення завдань LLM-інтеграції у земельний кадастр до ширших програм цифрової відбудови України, що фінансуються ЄС та Світовим банком.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у запропонованій трихвильовій періодизації цифрової трансформації управління земельними ресурсами з уніфікованим набом

ром параметрів порівняння, а також у структурованій матриці бар'єрів і можливостей впровадження агентних систем, адаптованій до вітчизняного контексту відбудови та євроінтеграції.

Обговорення

Отримані результати дозволяють сформулювати кілька концептуальних спостережень щодо природи технологічних переходів у земельному менеджменті. По-перше, зміна поколінь не є лінійним прогресом за одним виміром – вона є багатовимірною трансформацією, що зачіпає одночасно технологічний, організаційний та інституційний рівні системи.

По-друге, Україна перебуває у нетривіальній стартовій позиції для впровадження третього покоління технологій. З одного боку, відставання у другому поколінні (обмежене поширення ML-workflow у земельних органах) є очевидним недоліком. З іншого – відсутність інерції масштабних інвестицій у застарілі рішення відкриває можливість для стратегії технологічного стрибка (leapfrogging), коли країна одразу переходить до найновішого рівня, омиваючи проміжні сходинки. Саме таку траєкторію обрали окремі країни Африки, що перейшли від відсутності банківської інфраструктури безпосередньо до мобільних платіжних систем.

По-третє, Концепція розвитку штучного інтелекту в Україні [14] та проголошена Міністерством цифрової трансформації концепція «агентної держави» [11] формують інституційну рамку, яка за умови ефективної реалізації може суттєво прискорити впровадження LLM-агентів у земельне управління. Принциповим є те, що

ця рамка виникає на основі системного бачення, а не як реакція на окремі технологічні тренди.

Окремій увазі потребує еколого-економічний вимір переходу. З одного боку, цифрові інструменти підвищують ефективність землекористування (точніше зрощення, обґрунтованіше внесення агрохімікатів, швидший аналіз). З іншого – самі великі мовні моделі мають власний екологічний слід, тож коректне зіставлення їх впливу з альтернативними сценаріями інтелектуальної праці потребує окремого оцінювання життєвого циклу [10].

Водночас необхідно зберігати тверезість в оцінці ризиків. Галюцинації LLM-моделей у контексті юридично значущих кадастрових даних становлять серйозну загрозу і вимагають обов'язкового дотримання принципу «людина в контурі» (human-in-the-loop). Жодне автоматизоване рішення у сфері земельного права не може набирати чинності без верифікації компетентним фахівцем – принаймні на поточному рівні розвитку технології. Ця вимога не нівелює потенціал LLM-агентів, але змінює їх роль: вони є інструментом підтримки прийняття рішень, а не заміщення людської відповідальності.

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Цифровізація управління земельними ресурсами в Україні пройшла два завершені технологічні покоління – від ГІС та DSM до методів машинного навчання і дистанційного зондування – та перебуває на початку третього, пов'язаного з агентними системами на основі великих мовних моделей.

2. Між другим і третім поколіннями існує принципова якісна відмінність: якщо перехід від першого до другого покоління є еволюційним (більше автоматизації при збереженні людини-оператора), то третє покоління інвертує модель взаємодії – людина з оператора перетворюється на постановника задачі, а агент самостійно планує та виконує аналітичний процес.

3. Вітчизняна система управління земельними ресурсами має потенціал технологічного стрибка, але реалізація цього потенціалу вимагає одночасного вирішення п'яти груп проблем: якості та інтероперабельності даних, кадрового потенціалу, нормативного регулювання, фінансування та кібербезпеки.

4. Контекст повоєнної відбудови є не лише викликом, а й каталізатором технологічної модернізації: масштаб завдань з відновлення земельної документації на деокупованих територіях об'єктивно вимагає інструментів, що виходять за межі можливостей традиційних підходів.

5. Перспективою подальших досліджень є розробка методологічних засад оцінки готовності конкретних земельних органів до впровадження LLM-агентів та пілотне тестування таких систем на реальних кадастрових масивах деокупованих територій.

Декларація щодо використання штучного інтелекту

Під час підготовки цього рукопису автори використовували генеративний інструмент штучного інтелекту (Claude, Anthropic) для мовно-стилістичного редагування, структурування викладу та перекладу анотації англійською мовою. Після використання цього інструмента автори особисто

перевірили, відредагували й переглянули зміст і несуть повну відповідальність за наукову достовірність, дані, інтерпретації та висновки. Інструмент ШІ не застосовувався для генерування наукових результатів, джерел, цитат або числових даних.

Список використаної літератури

1. Таратула Р. Б. Еколого-економічні засади інформаційного забезпечення управління земельними ресурсами: дис. ... д-ра екон. наук: 08.00.06. Львів: ЛНАУ, 2019. 446 с.
2. Полтавець А. М. Механізми управління земельними ресурсами аграрних підприємств: теорія, методологія, практика: дис. ... д-ра екон. наук: 08.00.04. Суми: СНАУ, 2022. 317 с.
3. Інститут землекористування НААН. Інформаційно-аналітичне забезпечення управління земельними ресурсами: звіт про НДР (№ ДР 0121U108443). Київ, 2024. 143 с.
4. Маланчук М., Музика Н., Кравчук М., Лук'яненко Ю. О. Перспективи використання штучного інтелекту в кадастрових та землевлпорядних процесах. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2024. Т. 9, № 4. С. 282–287. DOI: 10.36887/2415-8453-2024-4-42.
5. Minasny B., McBratney A. B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311.
6. Nasirahmadi A., Hensel O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 2. Art. 498.
7. Li Z., Ning H., Gao S., Janowicz K. et al. GIScience in the era of Artificial Intelligence: a research agenda towards Autonomous GIS. *Annals of GIS*. 2025. Vol. 31, № 4. P. 501–536. DOI: 10.1080/19475683.2025.2552161.
8. Ramsewak D., Jagassar A., Edwards B., Potts A. A digital twin for monitoring land

- use/cover and coastal change in Tobago. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. XLVIII-G-2025. P. 1263–1268. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-G-2025-1263-2025.
9. Scandurra S., Antuono G., Galluccio G. A BI Tool to Support Decision-Making Processes for Public Heritage Assets in CIM Systems. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. XLVIII-M-9-2025. P. 1341–1347. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-1341-2025.
 10. Ren S., Tomlinson B., Black R. W., Torrance A. W. Reconciling the contrasting narratives on the environmental impact of large language models. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 26310.
 11. Міністерство цифрової трансформації України. Від цифрової держави до агентної держави. 2026. URL: <https://digitalstate.gov.ua> (дата звернення: 12.04.2026).
 12. Про національну інфраструктуру геопросторових даних: Закон України від 13.04.2020 № 554-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20> (дата звернення: 12.04.2026).
 13. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union. 2007. L 108. P. 1–14.
 14. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні: розпорядження Кабінету Міністрів України від 02.12.2020 № 1556-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80> (дата звернення: 12.04.2026).
 15. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
 16. Government of Ukraine, World Bank Group, European Commission, United Nations. Ukraine. Fifth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): February 2022 – December 2025. Washington, DC; Kyiv, 2026. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2026/02/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released> (дата звернення: 12.04.2026).
-

References

1. Taratula, R. B. (2019). Ekolooho-ekonomichni zasady informatsiinoho zabezpechennia upravlinnia zemelnymy resursamy [Ecological and economic foundations of information support for land resource management] (Doctoral dissertation, Lviv National Agrarian University). Available at: <https://lnau.edu.ua>
2. Poltavets, A. M. (2022). Mekhanizmy upravlinnia zemelnymy resursamy ahrarnykh pidpriemstv: teoriia, metodolohiia, praktyka [Mechanisms of land resource management of agricultural enterprises: Theory, methodology, practice] (Doctoral dissertation, Sumy National Agrarian University). Available at: <https://snau.edu.ua>
3. Institute of Land Use of NAAS. (2024). Informatsiino-analitychne zabezpechennia upravlinnia zemelnymy resursamy [Information and analytical support for land resource management] (Research Report No. 0121U108443). Kyiv. Available at: <https://land.gov.ua>
4. Malanchuk, M., Muzyka, N., Kravchuk, M., & Lukianchenko, I. (2024). Prospects of the use of artificial intelligence in cadastral and land regulation processes. Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology, 9(4), 282–287. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-4-42>
5. Minasny, B., & McBratney, A. B. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. Geoderma, 264, 301–311.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.10.025>
6. Nasirahmadi, A., & Hensel, O. (2022). Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. *Sensors*, 22(2), Article 498. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22020498>
 7. Li, Z., Ning, H., Gao, S., Janowicz, K., Li, W., Arundel, S. T., Yang, C., Bhaduri, B., Wang, S., Zhu, A.-X., Gahegan, M., Shekhar, S., Ye, X., McKenzie, G., Cervone, G., & Hodgson, M. E. (2025). GIScience in the era of artificial intelligence: A research agenda towards Autonomous GIS. *Annals of GIS*, 31(4), 501–536. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475683.2025.2552161>
 8. Ramsewak, D., Jagassar, A., Edwards, B., & Potts, A. (2025). A digital twin for monitoring land use/cover and coastal change in Tobago. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-G-2025, 1263–1268. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-G-2025-1263-2025>
 9. Scandurra, S., Antuono, G., & Galluccio, G. (2025). A BI tool to support decision-making processes for public heritage assets in CIM systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-9-2025, 1341–1347. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-1341-2025>
 10. Ren, S., Tomlinson, B., Black, R. W., & Torrance, A. W. (2024). Reconciling the contrasting narratives on the environmental impact of large language models. *Scientific Reports*, 14, Article 26310. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77260-7>
 11. Ministry of Digital Transformation of Ukraine. (2026). From a digital state to an agentic state. Available at: <https://digitalstate.gov.ua>
 12. Verkhovna Rada of Ukraine. (2020). Law of Ukraine No. 554-IX: On the National Geospatial Data Infrastructure. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20>
 13. European Parliament and Council of the European Union. (2007). Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). *Official Journal of the European Union*, L (108), 1–14. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32007L0002>
 14. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020). On the approval of the Concept for the development of artificial intelligence in Ukraine (Order No. 1556-r of December 2, 2020). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80>
 15. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
 16. Government of Ukraine, World Bank Group, European Commission, & United Nations. (2026). Ukraine: Fifth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5), February 2022 – December 2025. World Bank. Available at: <https://www.worldbank.org/en/country/ukraine/publication/rapid-damage-and-needs-assessment-rdna5>

Koshel D., Koshel A.

DIGITAL TRANSFORMATION OF LAND RESOURCE MANAGEMENT IN UKRAINE: FROM GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS TO INTELLIGENT AGENTS LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 3'26: 56-66.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.03.04>

Abstract. *The article examines the evolution of digital tools for land resource management in Ukraine through the lens of changing technological paradigms. Three successive generations of digital solutions are distinguished: the first, based on geographic information systems and digital soil mapping; the second, on machine-learning methods and the digital-twin concept; and the third, on generative artificial intelligence and large-language-model (LLM) agents. The study analyses the state of the national regulatory framework, data infrastructure and human capacity in the land-cadastral domain. It is shown that the transition to the third generation is not merely a quantitative improvement of individual indicators but a qualitative redefinition of the human role in spatial analysis: the analyst shifts from operator to task-setter, while the agent autonomously plans and performs the analytical process. Using a unified set of parameters, a comparative characterisation of the three generations is compiled, and a matrix of barriers and opportunities is formed across five domains – data, human capacity, regulation, financing and security. Key prerequisites for a technological-leapfrogging trajectory are substantiated in the context of post-war reconstruction and European integration, together with the imperative of a human-in-the-loop principle for legally significant cadastral data.*

Keywords: *digital transformation; land resource management; geographic information systems; machine learning; LLM agents; land cadastre; artificial intelligence; Autonomous GIS.*
