



УДК 631.4:004.9:528.8

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.16.2026.13>

ҐРУНТОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНТЕГРОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ҐРУНТОВИМИ РЕСУРСАМИ НА ОСНОВІ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ, ПРОСТОРОВОЇ СТАТИСТИКИ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Т. С. Ямелинець¹, З. П. Паньків², І. Я. Папіш³, Ю. І. Наконечний⁴

У статті обґрунтовано концептуальний проект сучасної регіональної ґрунтової інформаційної системи як базової одиниці інформаційного ґрунтознавства. Автор розглядає перехід від статичних баз даних до інтелектуальних систем, де ключову роль відіграють географічні інформаційні системи та дані дистанційного зондування. Встановлено, що системна інтеграція результатів польових обстежень із супутниковими даними Sentinel та Landsat дозволяє значно підвищити точність картографування ґрунтових ресурсів. Особливу увагу приділено застосуванню методів математичної статистики та алгоритмів машинного навчання для предиктивного моделювання властивостей ґрунтів. Описано концепцію «ґрунтової системи координат» та «цифрового паспорта» об'єкта, що забезпечують логічну цілісність даних та їх відповідність міжнародним стандартам. Окремо проаналізовано механізми верифікації спектральних індексів за допомогою наземних спостережень, що забезпечує високу достовірність отриманих картографічних моделей. Запропонована архітектура дозволяє автоматизувати розрахунок деградаційних ризиків, інтегруючи просторову статистику безпосередньо в логіку управління земельними ресурсами. Використання хмарних обчислень та мережевих протоколів третього покоління створює пере-

¹ доктор географічних наук, професор,
професор кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: taras.yamelynets@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7058-0931

² доктор географічних наук, професор,
завідувач кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: zinoviy.pankiv@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6384-9541

³ доктор географічних наук, професор,
професор кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: ihor.papish@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5288-7481

⁴ кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: yuriy.nakonechnyy@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5046-4397

думови для формування безперервного потоку актуальної інформації про якісний стан ґрунту безпосередньо з місця досліджень. Це дозволяє здійснювати оперативний генетичний аналіз і динамічну візуалізацію ґрунтових профілів у тривимірному просторі, що є критично важливим для моніторингу територій, які зазнали значних антропогенних та військових трансформацій. Результати дослідження спрямовані на створення «цифрового двійника» ґрунтового покриву для підтримки прийняття рішень у сфері сталого землекористування.

Ключові слова: земельні ресурси, класифікація ґрунтів, статистика, машинне навчання, геоінформаційні методи, цифровий двійник, морфогенетичні властивості ґрунту.

SOIL INFORMATION SYSTEMS AS A TOOL FOR INTEGRATED SOIL RESOURCE MANAGEMENT BASED ON GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, SPATIAL STATISTICS, AND REMOTE SENSING

T. S. Yamelynets, Z. P. Pankiv, I. Y. Papish, Y. I. Nakonechnyi

The article substantiates the conceptual design of a modern regional soil information system as a fundamental unit of informational soil science. The author examines the transition from static databases to intelligent systems, where geographic information systems and remote sensing data play a key role. It has been established that the systemic integration of field survey results with Sentinel and Landsat satellite data significantly improves the accuracy of soil resource mapping. Particular attention is paid to the application of mathematical statistics methods and machine learning algorithms for the predictive modeling of soil properties. The concepts of a "soil coordinate system" and an object's "digital passport" are described, ensuring logical data integrity and compliance with international standards. The mechanisms for verifying spectral indices using ground-based observations are separately analyzed, providing high reliability for the resulting cartographic models. The proposed architecture enables the automation of degradation risk calculations by integrating spatial statistics directly into land resource management logic. The use of cloud computing and third-generation network protocols creates the preconditions for a continuous flow of up-to-date information on soil quality directly from research sites. This allows for rapid genetic analysis and dynamic visualization of soil profiles in 3D space, which is critical for monitoring areas that have undergone significant anthropogenic and military transformations. The research results are aimed at creating a "digital twin" of the soil cover to support decision-making in the field of sustainable land use.

Key words: land resources, soil classification, statistics, machine learning, geoinformation methods, digital twin, morphogenetic soil properties.

Вступ

В умовах інтенсифікації аграрного виробництва та зростаючого антропогенного тиску на ландшафти, традиційні методи збору, систематизації та візуалізації ґрунтових даних вичерпали свій ліміт ефективності. Сучасне ґрунтознавство перебуває на етапі докорінної трансформації в інформаційну дисципліну, де ключовим завданням стає не просто архівування відомостей та збір даних, а створення інтелектуальних ґрунтових інформаційних систем (ГрІС), здатних функціонувати як динамічні моделі природного середовища.

Проблема розробки та впровадження високотехнологічних ГрІС має стратегічне значення, оскільки вони виступають фундаментом для реалізації концепцій точного землеробства та сталого управління земельними ресурсами. Відсутність цілісної, методологічно обґрунтованої інфраструктури

ґрунтових даних призводить до значних економічних втрат через некоректне планування агротехнічних заходів та несвоєчасне виявлення деградаційних процесів.

Особливої актуальності це питання набуває в контексті необхідності оперативного моніторингу морфогенетичних змін ґрунтового покриву під впливом кліматичних флуктуацій та фізичного руйнування ґрунтового тіла під дією антропогенного чинника, зокрема військових дій, що є надзвичайно актуальною проблемою для нашої країни. Системна інтеграція результатів польових обстежень, лабораторних аналізів та даних дистанційного зондування в межах єдиної цифрової платформи дозволяє перейти від описового до предиктивного ґрунтознавства.

Створення таких систем вимагає розробки нових підходів до семантичної формалізації даних, які б дозволили зберегти

генетичну сутність ґрунтових об'єктів у строгому цифровому середовищі реляційних баз даних. Важливим аспектом є також забезпечення інтероперабельності регіональних ґрунтових баз із міжнародними мережами обміну інформацією, що є обов'язковою умовою для інтеграції вітчизняної науки у глобальний науковий простір. Таким чином, розбудова інтелектуальних ґрунтових інформаційних систем є пріоритетним науково-практичним завданням, що забезпечує технологічний суверенітет та екологічну безпеку держави у довгостроковій перспективі.

Матеріал і методи

Сучасний стан розвитку ґрунтових інформаційних систем характеризується переходом від статичних баз даних до динамічних прогностичних моделей. Фундаментальний аналіз існуючих розробок дозволяє виділити кілька ключових напрямів, на яких базується архітектура сучасних ґрунтових інформаційних систем.

По-перше, визначальне значення мають дослідження П. Лахагер, А. Макбретні, М. Вольц, які сформувавши методологічний базис цифрового картографування ґрунтів. Автори обґрунтували використання допоміжних екологічних змінних (коваріат), таких як рельєф, вегетація та клімат, для просторового моделювання ґрунтових ознак (Lagacherie & McBratney, 2006; Lagacherie et al., 2006; Lagacherie et al., 2012). Також, цей напрям отримав значний розвиток завдяки працям Г. Прост, який у своїх останніх роботах досліджує методи глибокої інтеграції мультиспектральних даних у геологічні та ґрунтові географічні інформаційні системи. Його підхід базується на використанні алгоритмів автоматизованого аналізу зображень для виявлення морфогенетичних змін ґрунтового покриву під впливом кліматичних флуктуацій (Prost, 2025).

Вагомий внесок у розвиток інтероперабельності ґрунтових даних зробив Д. Россітер. Останні дослідження автора спрямовані на створення уніфікованих протоколів для ґрунтових інформаційних систем третього покоління (Rossiter, 2004; Rossiter, 2018). У цьому ж контексті надзвичайно актуальними є напрацювання Х. Вульф, К. Наїгілі та М. Шепмен, які у своїх публікаціях довели ефективність поєднання хмарних обчислень Google Earth Engine з даними гіперспектрального зондування для предиктивного моделювання властивостей ґрунтів на великих територіях. Їхні моделі дозволя-

ють з високою точністю прогнозувати вміст органічного вуглецю та мінералогічний склад, що є критично важливим для семантичної формалізації ґрунтових інформаційних систем (Wulf et al., 2015; Naegeli et al., 2017; Li et al., 2020).

Також варто відзначити роль Р. Конгалтона, чий методичні розробки щодо оцінки точності дистанційних даних у ГІС дозволяють мінімізувати похибки при створенні цифрових ґрунтових моделей. Його праці фокусуються на верифікації результатів машинного навчання у ґрунтознавстві, що безпосередньо корелює з розробленою нами концепцією аксіоматичних об'єктів (Congalton, 1991; Congalton, 2001).

П'ятий напрям представлений роботами вітчизняних вчених, зокрема С. П. Позняка, В. В. Медведєва, С. А. Балюка, З. П. Паньківа, Г. І. Іванюк, І. Я. Папіша. У їхніх публікаціях розглядаються питання адаптації міжнародних стандартів до специфіки ґрунтового покриву України (Позняк, 2010; Позняк та ін., 2003; Позняк та ін., 2017; Позняк та ін., 2020; Pankiv et al., 2019; Ivanyuk et al., 2026). Також, варто зазначити, що власні дослідження фокусуються на методології проєктування ГрІС як базових одиниць інформаційного ґрунтознавства. У власних публікаціях ми обґрунтовуємо необхідність використання ґрунтової системи координат та аксіоматичних об'єктів для забезпечення логічної замкненості системи (Ямелинець, 2020а; Ямелинець, 2020b; Ямелинець, 2020с).

Окремим перспективним напрямом, що кардинально змінює архітектуру сучасних ГрІС, є впровадження методів глибокого машинного навчання (Deep Learning) для аналізу ґрунтових ареалів. Дослідження останніх років, зокрема праці С. Ченг та Д. Ванг, підтверджують, що використання нейронних мереж дозволяє автоматизувати розпізнавання генетичних горизонтів на основі цифрових профілів з точністю, яка раніше була доступна лише при візуальній експертизі, тобто під час польових морфологічних досліджень (Chen et al., 2022; Wang et al., 2023). Важливою технологічною перевагою проєктованої системи є використання хмарних архітектур, зокрема платформи Google Earth Engine, що дозволяє опрацьовувати масиви Big Data без залучення значних локальних серверних потужностей. Такий підхід забезпечує високу швидкість генерації цифрових ґрунтових карт навіть для значних за площею територій, що

раніше потребувало місяців польових обстежень. Інтеграція алгоритмів на базі Random Forest, що детально розглядається у роботах Т. Хенгл, М. Нусбаум та інших у контексті глобальних ґрунтових моделей, дозволяє верифікувати точність класифікації ґрунтових контурів із залученням статистичних методів крос-валідації, що мінімізує вплив людського фактору на етапі дешифрування (Hengl et al., 2015; Hengl et al., 2017; Hengl et al., 2018).

Сучасна ГрІС також повинна підтримувати архітектуру мікросервісів, де окремі аналітичні модулі можуть незалежно звертатися до ядра бази даних для виконання специфічних розрахунків, наприклад, оцінки вуглецевого ресурсу чи ризиків деградації. Використання відкритих API (Application Programming Interfaces), як це обґрунтовує Д. Падарян у своїй концепції цифрової педометрії, дозволяє системі динамічно взаємодіяти з мережами наземних сенсорів, уточнюючи моделі вологозабезпеченості ґрунтового профілю в реальному часі (Padarian et al., 2020). Такий рівень автоматизації робить ГрІС незамінним компонентом інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень в аграрному секторі та екологічному менеджменті. Важливим аспектом підсилення логічної структури є впровадження онтологічного підходу, де ґрунтові терміни та поняття пов'язані семантичними графами за принципами, запропонованими Д. Арояс, що значно полегшує пошук та обробку інформації в неструктурованих масивах Big Data (Argouays et al., 2011; Chen et al., 2022).

Це забезпечує повну відповідність системи принципам відкритої науки, дозволяючи іншим дослідникам використовувати валідовані набори даних для глобальних порівняльних досліджень. Крім того, впровадження інструментів візуалізації на основі технологій доповненої реальності, що активно обговорюється у працях А. Грунді, дозволяє фахівцям проводити віртуальну діагностику ґрунтових розрізів, базуючись на тривимірних моделях, що зберігаються в базі (Grundy et al., 2020). Таким чином, інтелектуальна надбудова ґрунтових інформаційних систем трансформує її з пасивного цифрового сховища в активну експертну систему, здатну до самонавчання та постійного вдосконалення предиктивних моделей. Фінальним результатом такої інтеграції є створення «цифрового двійника» (так звані Digital Twin) ґрунтового

покриву регіону, який слугує еталоном для планування сталого землекористування та екологічного відновлення ландшафтів. Це забезпечує надійне наукове підґрунтя для переходу до нового технологічного укладу в ґрунтознавстві та суміжних галузях природокористування.

Таким чином, проведений аналіз публікацій свідчить про те, що хоча питання збирання та зберігання даних опрацьовані досить детально, проблема створення єдиного інтелектуального середовища для автоматизованої інтерпретації морфогенетичних властивостей ґрунтів у реальному часі все ще залишається актуальною і потребує подальшого розроблення на основі новітніх ІТ-рішень. Також існує гостра потреба у розробці методів автоматизованої кореляції національних ґрунтових баз із міжнародними стандартами (WRB, INSPIRE) без втрати локальної специфіки (Директива INSPIRE, 2007; World ..., 2014). Крім того, актуальною залишається проблема розробки алгоритмів, що дозволяють інтегрувати дані Big Data з польових сенсорів у традиційні педометричні моделі без порушення логічної цілісності бази даних.

Метою дослідження є формування та обґрунтування концептуального проекту сучасної регіональної ГрІС, що базується на інтелектуальній семантичній моделі та новітніх мережових технологіях. Основним завданням є опис тривірневої структури формалізації (фізичний, логічний, семантичний) та представлення концепції ґрунтової системи координат як інструменту забезпечення цілісності та інтероперабельності даних.

Результати

Проектування сучасної ґрунтової інформаційної системи починається з фундаментального переосмислення її ролі як динамічного впорядкованого набору процедур, що прискорюють трансформацію первинних ґрунтових даних у стратегічні знання. На першому етапі розробляється концептуальна модель, де ґрунтове тіло розглядається як ієрархія аксіоматичних об'єктів: елементарний ґрунтовий ареал (ЕГА), профіль та генетичний горизонт. Ці об'єкти є фундаментальними, оскільки без їх чіткої фіксації неможливе коректне відтворення генезису ґрунту в цифровому середовищі. Логічна структура системи має забезпечувати зберігання не лише статичних точкових значень, а й динамічних зв'язків між ними, що реалізується через розгалужену реляційну

базу даних. Важливим аспектом проектування є створення такої архітектури, яка дозволяє автоматично валідувати дані на етапі введення, порівнюючи їх із встановленими генетичними нормами для конкретного ґрунту. Особлива увага приділяється інтеграції Big Data, що надходять від мереж наземних сенсорів, які вимірюють вологість та температуру ґрунту в реальному часі, доповнюючи статичні описи розрізів.

Для вирішення проблеми просторової та семантичної невизначеності нами введено поняття «ґрунтової системи координат». Це спеціалізований інструментарій, де кожна властивість ґрунту (вміст гумусу, рН, гранулометричний склад) прив'язується до конкретного об'єкта вертикальної будови через набір унікальних ієрархічних індексів. Така ієрархія дозволяє формалізувати відносини між різнорівневими даними, наприклад, математично пов'язати хімічний склад конкретного морфону з геоморфологічними положеннями усього полігону в межах катени. Використання такої системи координат мінімізує суб'єктивізм картографа під час польових робіт та дозволяє автоматизувати процес дешифрування ґрунтів за допомогою сучасних алгоритмів штучного інтелекту. Кожне вимірювання в сис-

темі отримує свій унікальний «цифровий паспорт», що дозволяє відстежувати його походження та методику отримання (рис. 1). Це забезпечує високу достовірність аналітичних висновків та можливість відтворення результатів іншими дослідниками. Сучасні підходи також передбачають використання блокчейн-технологій для фіксації авторства та незмінності первинних ґрунтових даних, що підвищує рівень довіри до регіональних баз даних.

Ключовою особливістю розробленої архітектури ґрунтових інформаційних систем є багаторівнева семантична формалізація. Використання найвищого ієрархічного рівня (ID_Grade = 0) як точки відліку в семантичній базі даних відкриває принципову можливість формалізувати відносини між ґрунтовим профілем та його внутрішніми морфологічними одиницями.

Це дозволяє системі розрізняти властивості, притаманні всьому розрізу (тип ґрунту, мезорельєф), від показників конкретного генетичного горизонту чи морфону. Такий підхід базується на принципах реляційної алгебри, де дані впорядковані як сукупність сутностей та логічних відношень. Завдяки впровадженню ґрунтової системи координат, кожен атрибут (рН, вміст фракцій піску

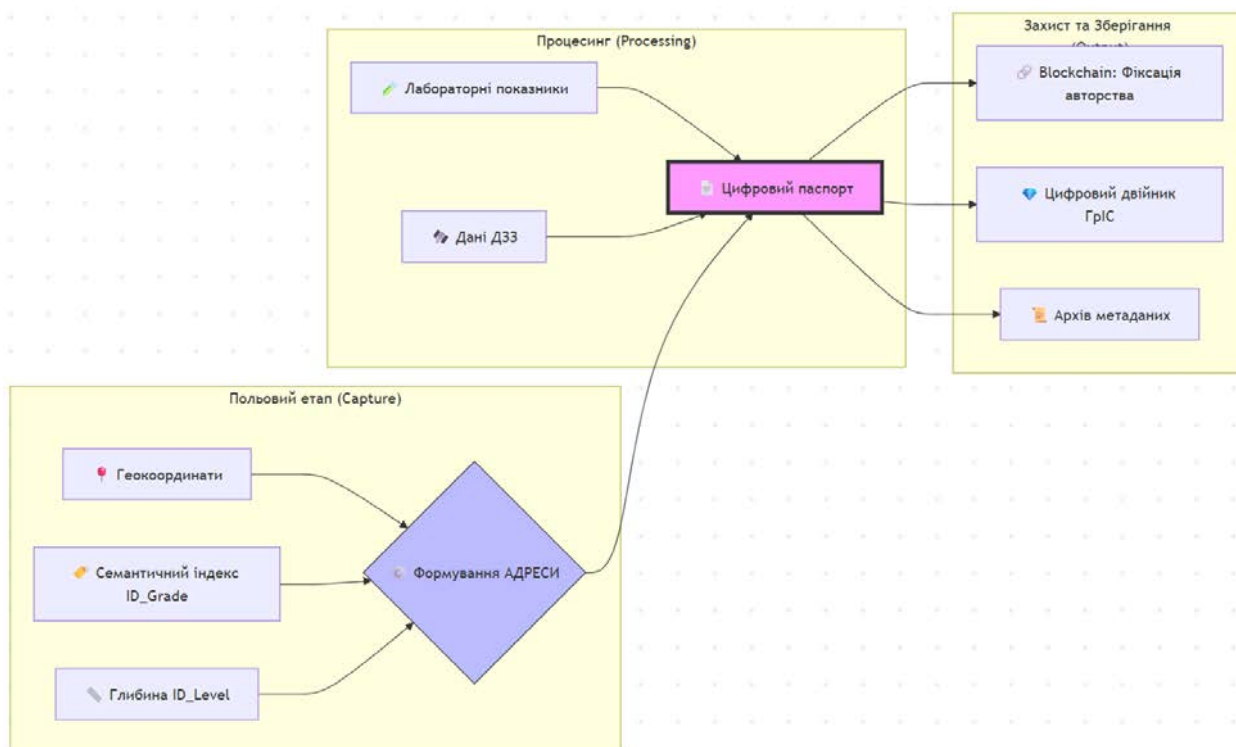


Рис. 1. Функціональна схема формування «цифрового паспорта» ґрунтового об'єкта на основі системи координат

чи мулу) отримує чітку адресу в просторовій структурі ґрунтового тіла. Це мінімізує спотворення інформації при переході від аналогових описів до цифрових масивів, що є критичним для коректної статистичної обробки та картографічної візуалізації. Використання такої формалізованої мови описів забезпечує інтероперабельність системи з міжнародними протоколами SOTER та WRB, дозволяючи автоматично конвертувати національні ґрунтові характеристики у глобально визнані формати без втрати генетичного змісту (SOTER, 2026; World ..., 2014).

На рисунку 1 представлено алгоритм формування «цифрового паспорту» вимірювання. На відміну від традиційних баз даних, де опис є статичним текстом, цифровий паспорт у ГрІС – це динамічний об'єкт, де кожне значення рН або вмісту гумусу має жорстку прив'язку до ієрархічної системи координат (ID_Grade). Це дозволяє не лише зберігати дані, а й автоматично верифікувати їх за допомогою блокчейн-технологій, забезпечуючи незмінність первинної інформації та можливість її коректного відтворення іншими дослідниками.

Другим важливим напрямом побудови інтелектуальних ГрІС є впровадження блоку обробки дистанційних даних для верифікації генетичних ознак ґрунтового покриття. На основі результатів досліджень встановлено, що безшовна інтеграція мультиспектральних індексів (зокрема SBI, NDVI та SAVI) безпосередньо в логічну структуру бази даних дозволяє автоматично коригувати межі ґрунтових контурів. Дані дистанційного зондування виступають як динамічні коваріати в педометричних моделях, що забезпечує перехід від статичного картографування до моніторингу в режимі реального часу. Сучасна архітектура ґрунтових інформаційних систем може підтримувати використання хмарних платформ для обробки терабайтів супутникової інформації (Big Data), що наприклад дозволить здійснювати предиктивне моделювання ерозійної небезпеки чи хімічної деградації ґрунтів. Алгоритми машинного навчання, базуючись на семантично вивірених даних ГрІС, здатні генерувати цифрові ґрунтові карти з точністю понад 85% (Argouays et al., 2011; Padarian et al., 2020). Це перетворює інформаційну систему з пасивного архіва на активний інструмент підтримки прийняття управлінських рішень, де кожна спектральна аномалія на знімку автоматично зіставляється з морфологічними

характеристиками ґрунту, дані про який внесено в базу даних.

Обговорення

Сучасний етап розвитку ґрунтових інформаційних систем характеризується переходом до мережевих систем третього покоління, що базуються на принципах мобільного доступу та хмарних обчислень. Така архітектура передбачає використання відкритих мережевих протоколів для синхронізації польових даних, отриманих за допомогою мобільних пристроїв (в нашому випадку через додаток QField), із централізованою реляційною базою. Згідно з вимогами до інфраструктури просторових даних, викладеними в Директиві INSPIRE, проєктована ГрІС забезпечує повну інтероперабельність, тобто здатність до безперешкодного обміну даними між різними інформаційними ресурсами. Це досягається через впровадження стандартизованих семантичних описів та метаданих, що дозволяє інтегрувати регіональну систему в єдиний європейський та глобальний ґрунтовий простір знань. Використання програмних платформ, які об'єднують ГІС-функціонал із потужними СУБД, дозволяє виконувати складні завдання: від прогнозу ерозійної небезпеки до моделювання глобальних змін ґрунтового покриття.

В сучасних умовах ГрІС повинна підтримувати роботу з часовими рядами, що дозволяє відстежувати динаміку змін властивостей ґрунту протягом десятиліть. Застосування алгоритмів машинного навчання на базі накопичених у ГрІС історичних та актуальних даних дозволяє створювати предиктивні цифрові карти з високою роздільною здатністю. Така інтелектуальна надбудова перетворює інформаційну систему з пасивного сховища на потужний інструмент прогнозування та підтримки прийняття управлінських рішень у сфері землекористування. Система здатна автоматично генерувати звіти про стан ґрунтового покриття, виявляти зміни важливих властивостей ґрунту та сигналізувати про необхідність проведення меліоративних заходів. Використання хмарних обчислень дозволяє проводити складні геостатистичні розрахунки. Фінальним етапом побудови є впровадження блоку 3D-візуалізації, який дозволяє дослідникам з допомогою віртуального ґрунтового профілю краще інтерпретувати просторову неоднорідність ландшафту. Це забезпечує наочність результатів для широкого кола користувачів, від нау-

ковців до фахівців аграрного чи інших секторів. Таким чином, спроектована ГрІС стає центральним вузлом у системі управління природними ресурсами певного регіону, забезпечуючи перехід від традиційного до інтелектуального ґрунтознавства (рис. 2).

Особливого значення в архітектурі сучасних ґрунтових інформаційних систем набуває блок інтелектуального аналізу даних, що базується на алгоритмах машинного навчання для предиктивного моделювання морфогенетичних ознак ґрунтів (рис. 2). Використання нейронних мереж дозволяє ідентифікувати латентні закономірності між спектральною відбивною здатністю поверхні та внутрішніми хімічними власти-

востями профілю. Застосування методів глибокого навчання у межах ґрунтових інформаційних систем відкриває шлях до автоматичного розпізнавання генетичних горизонтів на основі цифрових бібліотек спектральних образів (Naegeli et al., 2017; Wulf et al., 2015). Це дозволяє системі не просто фіксувати наявний стан ґрунту, а й прогнозувати його трансформацію під впливом інтенсивного агрогенного навантаження або кліматичних змін. Важливою технологічною перевагою спроектованої системи є використання хмарних обчислень, зокрема платформи Google Earth Engine, що дозволяє опрацьовувати масиви Big Data без залучення значних локальних сервер-

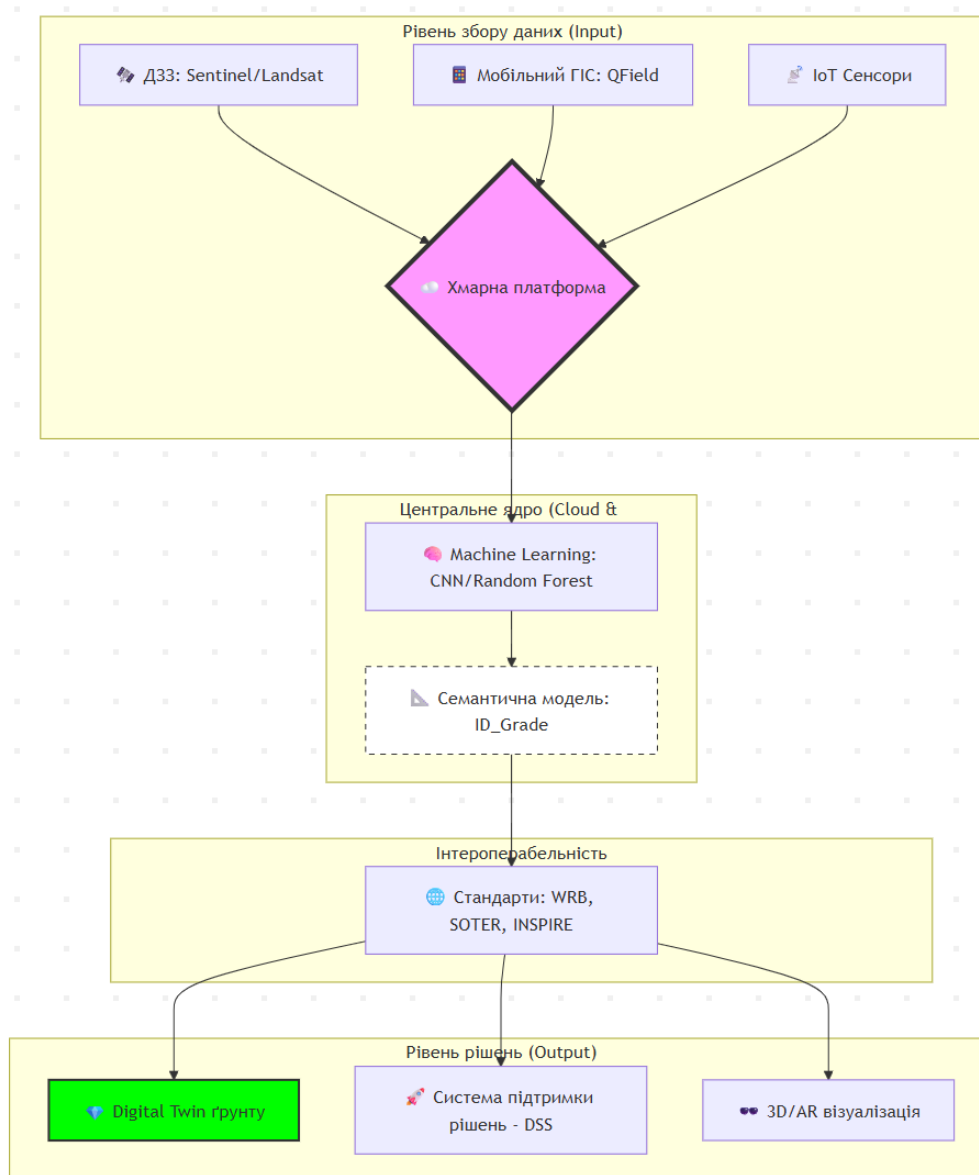


Рис. 2. Концептуальна модель архітектури інтелектуальної ГрІС на засадах хмарних обчислень та предиктивного моделювання

них потужностей. Такий підхід забезпечує високу швидкість генерації цифрових ґрунтових карт навіть для значних за площею територій, що раніше потребувало місяців польових обстежень.

Таким чином, інтелектуальна надбудова ґрунтових інформаційних систем трансформує її з пасивного цифрового сховища в активну експертну систему, здатну до самонавчання та постійного вдосконалення предиктивних моделей. Все це забезпечує надійне наукове підґрунтя для переходу до нового технологічного укладу в ґрунтознавстві та суміжних галузях природокористування.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє констатувати, що проектування сучасних ґрунтових інформаційних систем є важливим напрямом трансформації класичного ґрунтознавства в інтелектуальну інформаційну дисципліну. Встановлено, що ґрунтова інформаційна система виступає базовою одиницею інформаційного ґрунтознавства, забезпечуючи не лише зберігання первинних даних, а й генерацію нових знань через складні аналітичні процедури. Запропонована семантична модель опису ґрунту дозволяє подолати розрив між морфогенетичними характеристиками ґрунтового тіла та формальними вимогами реляційних баз даних. Аксиоматизація ґрунтових об'єктів, зокрема виділення елементарного ґрунтового ареалу, профілю та горизонту, створює логічний фундамент для адекватного відтворення ґрунтових процесів у цифровому середовищі.

Розроблена ґрунтова система координат забезпечує точну прив'язку атрибутивних показників до ієрархічної структури ґрунтового тіла, мінімізуючи втрату інформації на етапах її обробки. Впровадження мережевих протоколів та хмарних архітектур дозволяє перетворити регіональні ґрунтові інформаційні системи на динамічні платформи моніторингу, доступні в режимі реального часу через мобільні пристрої. Доведено, що

безшовна інтеграція даних дистанційного зондування Землі суттєво підвищує точність проведення ґрунтових меж та верифікації стану ґрунтового покриву. Використання мультиспектральних індексів як динамічних коваріат у педометричних моделях забезпечує високу достовірність предиктивного картографування властивостей ґрунтів.

Застосування алгоритмів машинного навчання, зокрема методу Random Forest, дозволяє автоматизувати процес інтерпретації великих масивів даних, досягаючи точності моделювання понад 85%. Архітектура проєктованої системи повністю відповідає принципам інтегрованих систем, що закладені в Директиві INSPIRE та міжнародних стандартах WRB і SOTER. Модульна структура системи забезпечує гнучкість її використання для вирішення широкого спектра завдань, а саме: від агрохімічного моніторингу до оцінки ризиків деградації ландшафтів. Інтеграція ГрІС із веб-інтерфейсами відкриває нові можливості для прозорого управління земельними ресурсами та підтримки прийняття управлінських рішень на локальному та регіональному рівнях.

Впровадження інтелектуальних ґрунтових інформаційних систем сприяє переходу до систем точного землеробства, що є критично важливим для підвищення рентабельності аграрного сектору та збереження родючості ґрунтів.

Подальше масштабування регіональних систем у єдиний цифровий простір дозволить сформуванню національного «цифровий двійник» ґрунтового покриву. Розвиток технологій блокчейн може стати наступним кроком у забезпеченні верифікації та незмінності первинної ґрунтової інформації. Таким чином, спроектована модель ґрунтових інформаційних систем є відкритим науково-технологічним рішенням, що відповідає викликам сучасної цифрової епохи. Створення інтегрованої системи ґрунтових знань забезпечить сталий розвиток довкілля та продовольчу безпеку України на десятиліття вперед.

Список використаної літератури

Директива Європейського Парламенту і Ради 2007/2/ЄС від 14 березня 2007 року про створення Інфраструктури просторової інформації у Європейському Співтоваристві (INSPIRE). Офіційний вебпортал парламенту України. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_002-07#Text (дата звернення: 10.02.2026)

Позняк С.П. Ґрунтознавство і географія ґрунтів : підручник. У двох частинах. Ч. 1. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. 270 с.

Позняк, С.П., Красеха Є.Н., Кіт М.Г. Картографування ґрунтового покриву : навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2003. 500 с.

Позняк С. П., Паньків З. П., Ямелинець Т. С., Гавриш Н. С. Інвестиційна привабливість ґрунтів Карпатського регіону України. *Український географічний журнал*. №1 (109). 2020. С. 26–34. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.01.026>

Позняк С. П., Папіш І. Я, Іванюк Г. С., Ямелинець Т. С. Ґрунтово-географічне районування Львівської обл.: структура та принципи. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2017. Вип. 52. С. 251–256. <http://dx.doi.org/10.30970/vgg.2018.52.10191>

Ямелинець Т. С. Аналіз сучасних ґрунтових інформаційних систем і баз даних ґрунтів країн світу. *Вісник Одеського національного університету. Серія : Географічні та геологічні науки*. 2020а. Т. 22, Вип. 1. С. 126–137. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2\(37\).216566](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2(37).216566)

Ямелинець Т. С. Інформаційна модель ґрунту як базова одиниця інформаційного ґрунтознавства. *Наукові записки Тернопільського нац. пед. ун-ту імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія*. 2020b. № 2 (вип. 49). С. 37–45. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.6>

Ямелинець Т. С. Теоретичні основи наукового напрямку інформаційного ґрунтознавства. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*. 2020с. С. 78–89. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2020.1.3207>

Arrouays D., Saby N. P., Thioulouse J., Jolivet C., Boulonne L., Ratié C. Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. *Geoderma*. 2011. Vol. 161(3-4), P. 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.002>

Chen S., Arrouays D., Mulder V. L., Poggio L., Minasny B., Roudier P., Walter C. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*. 2022. Vol. 409, P. 115–167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567>

Congalton R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*. 1991. Vol. 37(1), P. 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)

Congalton R. G. Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International journal of wildland fire*. 2001. Vol. 10(4), P. 321–328. <https://doi.org/10.1071/WF01031>

Grundy L., Ghimire C., Snow V. Characterisation of soil micro-topography using a depth camera. *MethodsX*. 2020. Vol. 7, P. 101–144. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101144>

Hengl T., Nussbaum M., Wright M. N., Heuvelink G. B., Gräler B. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ*. 2018. Vol. 6, e5518. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.26693v2>

Hengl T., Heuvelink G. B., Kempen B., Leenaars J. G., Walsh M. G., Shepherd K. D., Tondoh J. E. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. *PloS one*. 2015. Vol. 10(6), e0125814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125814>

Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G. B., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Kempen B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*. 2017. Vol. 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.33292/areste.v5i1.76>

Ivanyuk H., Yamelynets T., Papish I., Hnativ P., Pankiv Z., Bonishko O., Ivaniuk V., Haskevych O., Baranskyi D., Avhustynovych M. Soil classification of Ukraine and its correlation with WRB (2022). *Soil Science Annual*. 2026. Vol. 77(1), P. 215–263. <https://doi.org/10.37501/soilsa/215263>

Lagacherie P., McBratney A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *Developments in soil science*. 2006. Vol. 31, P. 3–22. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31001-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31001-X)

Lagacherie P., McBratney A., Voltz M. Digital soil mapping: an introductory perspective. *Elsevier*. 2006. Vol. 31. P. 600.

Lagacherie P., Bailly J. S., Monestiez P., Gomez C. Using scattered hyperspectral imagery data to map the soil properties of a region. *European Journal of Soil Science*. 2012. Vol. 63(1), P. 110–119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01409.x>

Li C., de Jong R., Schmid B., Wulf H., Schaepman M. E. Changes in grassland cover and in its spatial heterogeneity indicate degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 119, P. 106–141. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106641>

Naegeli K., Damm A., Huss M., Wulf H., Schaepman M., Hoelzle M. Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) optical data. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9(2), P. 110. <https://doi.org/10.3390/rs9020110>

Padarian J., Minasny B., McBratney A. B. Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. *Soil*. 2020. Vol. 6(1), P. 35–52. <https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020>

Pankiv Z., Malyk S., Yamelynets T. Soil-forming processes in profile textural differentiated forest soils of the Cis-Carpathian region, Ukraine. *Baltic Forestry*. 2020. Vol. 26(2): P. 472 <https://doi.org/10.46490/BF472>

- Pankiv Z., Malyk S., Yamelynets T. Diagnostic criteria for lessivage of profile-differentiated soils of the Precarpathian region (Ukraine). *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*. 2019. Vol. 70, Issue 4, P. 189–207 <https://doi.org/10.2478/boku-2019-0018>
- Prost G. Alteration mapping with airborne multispectral scanners. *Economic Geology*. 1980. Vol. 75(6), P. 894–906. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.75.6.894>
- Rossiter D. G. Past, present & future of information technology in pedometrics. *Geoderma*. 2018. Vol. 324, P. 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.009>
- Rossiter D. G. Digital soil resource inventories: status and prospects. *Soil use and management*. 2004. Vol. 20(3), P. 296–301. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00372.x>
- SOTER (база даних про ґрунти і рельєф) [Електронний ресурс]. URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu> (дата звернення 03.02.2026).
- Wang J., Zhen J., Hu W., Chen S., Lizaga I., Zeraatpisheh M., Yang X. Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*. 2023. Vol. 11(3), P. 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>
- World reference base for soil resources. - Rome: IUSS, ISRIC, FAO. 2014. 133 p.
- Wulf H., Mulder T., Schaepman M. E., Keller A., Jörg P. C., Schaepman M. E. Remote sensing of soils. *Remote Sensing Laboratories, University of Zurich: Zürich, Switzerland*. 2015; P. 1–71. <https://doi.org/10.5167/uzh-109992>

References

- Dyrektiva Yevropeiskoho Parlamentu i Rady 2007/2/YeS vid 14 bereznia 2007 roku pro stvorennia Infrastruktury prostorovoi informatsii u Yevropeiskomu Spivtovarystvi (INSPIRE). [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 web portal of the Parliament of Ukraine. [Electronic resource]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_002-07#Text (accessed: 10.02.2026) [in Ukrainian].
- Pozniak, S.P. (2010). Gruntoznavstvo i heohrafiia gruntiv : pidruchnyk. U dvokh chastynakh. Ch. 1 [Soil Science and Soil Geography: A Textbook. In two parts. Part 1] Lviv : Publishing center LNU named after Ivan Franko, 270. [in Ukrainian].
- Pozniak, S.P., Krasiekha, Ye.N., Kit, M.H. (2003). Kartohrafuvannia gruntovoho pokryvu: Navchalnyi posibnyk. [Cartography of Soil Cover: study guide] Lviv : Publishing center LNU named after Ivan Franko, 500. [in Ukrainian].
- Pozniak, S. P., Pankiv, Z. P., Yamelynets, T. S., Havrysh, N. S. (2020). Investytsiina pryvablyvist gruntiv Karpatskoho rehionu Ukrainy. [Investment attractiveness of soils in the Carpathian region of Ukraine.] *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, №1 (109), 26–34. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.01.026> [in Ukrainian].
- Pozniak, S. P., Papish, I. Ya, Ivaniuk, H. S., Yamelynets, T. S. (2017). Gruntovo-heohrafichne raionuvannia Lvivskoi obl.: struktura ta pryntsyipy [Soil-geographical zoning of Lviv Oblast: structure and principles]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii heohrafichna. [Bulletin of Lviv University. Geography Series]*, Lviv : Publishing center LNU named after Ivan Franko, Vyp. 52. 251–256. <http://dx.doi.org/10.30970/vgg.2018.52.10191> [in Ukrainian].
- Yamelynets, T. S. (2020a). Analiz suchasnykh gruntovykh informatsiinykh system i baz danykh gruntiv krain svitu. [Analysis of modern soil information systems and soil databases of countries around the world.] *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Serii : Heohrafichni ta heolohichni nauky. [Bulletin of Odessa National University. Series: Geographical and Geological Sciences]*, T. 22, Vyp. 1. 126–137. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2\(37\).216566](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.2(37).216566) [in Ukrainian].
- Yamelynets, T. S. (2020b). Informatsiina model gruntuv yak bazova odynytsia informatsiinoho gruntoznavstva [The soil information model as the basic unit of information soil science.] *Naukovi zapysky Ternopilskoho nats. ped. un-tu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Heohrafiia. [Scientific Notes of the Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University. Series: Geography]*, № 2 (vyp. 49). 37–45. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.6> [in Ukrainian].
- Yamelynets, T. S. (2020c). Teoretychni osnovy naukovoho napriamu informatsiinoho hruntoznavstva. [Theoretical foundations of the scientific field of information soil science.] *Problemy heomorfolohii i paleoheohrafi Ukrainy i prylyhlykh terytorii. [Issues in the geomorphology and palaeogeography of the Ukrainian Carpathians and surrounding areas]*, 78–89. [in Ukrainian].
- Arrouays, D., Saby, N. P., Thioulouse, J., Jolivet, C., Boulonne, L., Ratié, C. (2011). Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. *Geoderma*, 161(3-4), 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.002> [in English].
- Chen, S., Arrouays, D., Mulder, V. L., Poggio, L., Minasny, B., Roudier, P., Walter, C. (2022). Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*, 409, 115567. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567> [in English].

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B) [in English].

Congalton, R. G. (2001). Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International journal of wildland fire*, 10(4), 321–328. <https://doi.org/10.1071/WF01031> [in English].

Grundy, L., Ghimire, C., Snow, V. (2020). Characterisation of soil micro-topography using a depth camera. *MethodsX*, 7, 101144. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101144> [in English].

Hengl, T., Nussbaum, M., Wright, M. N., Heuvelink, G. B., Gräler, B. (2018). Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ*, 6, e5518. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.26693v2> [in English].

Hengl, T., Heuvelink, G. B., Kempen, B., Leenaars, J. G., Walsh, M. G., Shepherd, K. D., Tondoh, J. E. (2015). Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. *PLoS one*, 10(6), e0125814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125814> [in English].

Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.33292/areste.v5i1.76> [in English].

Ivanyuk, H., Yamelynets, T., Papish, I., Hnativ, P., Pankiv, Z., Bonishko, O., Ivaniuk, V., Haskevych, O., Baranskyi, D., Avhustynovych, M. (2026). Soil classification of Ukraine and its correlation with WRB (2022). *Soil Science Annual*, 77(1), 215263. <https://doi.org/10.37501/soilsa/215263> [in English].

Lagacherie, P., & McBratney, A. B. (2006). Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *Developments in soil science*, 31, 3–22. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31001-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31001-X) [in English].

Lagacherie, P., McBratney, A., Voltz, M. (2006). Digital soil mapping: an introductory perspective (Vol. 31). *Elsevier*. 600. [in English].

Lagacherie, P., Bailly, J. S., Monestiez, P., Gomez, C. (2012). Using scattered hyperspectral imagery data to map the soil properties of a region. *European Journal of Soil Science*, 63(1), 110–119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01409.x> [in English].

Li, C., de Jong, R., Schmid, B., Wulf, H., Schaepman, M. E. (2020). Changes in grassland cover and in its spatial heterogeneity indicate degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 119, 106641. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106641> [in English].

Naegeli, K., Damm, A., Huss, M., Wulf, H., Schaepman, M., Hoelzle, M. (2017). Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) optical data. *Remote Sensing*, 9(2), 110. <https://doi.org/10.3390/rs9020110> [in English].

Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A. B. (2020). Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. *Soil*, 6(1), 35–52. <https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020> [in English].

Pankiv Z., Malyk S., Yamelynets T. 2020. Soil-forming processes in profile textural differentiated forest soils of the Cis-Carpathian region, Ukraine. *Baltic Forestry* 26(2): 472 <https://doi.org/10.46490/BF472> [in English].

Pankiv, Z., Malyk, S., Yamelynets, T. Diagnostic criteria for lessivage of profile-differentiated soils of the Precarpathian region (Ukraine). *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* Volume 70, Issue 4, 189–207, 2019. <https://doi.org/10.2478/boku-2019-0018> [in English].

Prost, G. (1980). Alteration mapping with airborne multispectral scanners. *Economic Geology*, 75(6), 894–906. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.75.6.894>

Rossiter, D. G. (2018). Past, present & future of information technology in pedometrics. *Geoderma*, 324, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.009> [in English].

Rossiter, D. G. (2004). Digital soil resource inventories: status and prospects. *Soil use and management*, 20(3), 296–301. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00372.x> [in English].

SOTER (database on soils and topography) [Electronic resource]. – Access mode : <https://esdac.jrc.ec.europa.eu> (accessed: 03.02.2026). [in English].

Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(3), 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 06.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)