

**ІСТОРІЯ ТА МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

УДК 631.4:004.9:528.8

DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.26.1.1>

**Тарас ЯМЕЛИНЕЦЬ**, доктор географічних наук,  
професор кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7058-0931>

*Львівський національний університет імені Івана Франка*  
79000 м. Львів, вул. Дорошенка 41, Україна

**Зіновій ПАНЬКІВ**, доктор географічних наук,  
професор, завідувач кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6384-9541>

*Львівський національний університет імені Івана Франка*  
79000 м. Львів, вул. Дорошенка 41, Україна

**Андрій КИРИЛЬЧУК**, доктор географічних наук,  
професор кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3700-3331>

*Львівський національний університет імені Івана Франка*  
79000 м. Львів, вул. Дорошенка 41, Україна

**Олексій ТЕЛЕГУЗ**, кандидат географічних наук,  
доцент кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8779-8750>

*Львівський національний університет імені Івана Франка*  
79000 м. Львів, вул. Дорошенка 41, Україна

**Галина ІВАНЮК**, кандидат географічних наук,  
доцент кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8585-7307>

*Львівський національний університет імені Івана Франка*  
79000 м. Львів, вул. Дорошенка 41, Україна

**МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРАЦІЇ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ У  
РЕГІОНАЛЬНІ ҐРУНТОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ  
МОРФОГЕНЕТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ  
ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ**

*У статті досліджено методологічні засади поєднання технологій дистанційного зондування Землі з архітектурою регіональних ґрунтових інформаційних систем. Проаналізовано роль космічної зйомки як провідного джерела актуальних даних для верифікації та оновлення цифрових ґрунтових моделей. Розглянуто процеси формалізації ґрунтової інформації на фізичному, логічному та семантичному рівнях. Детально висвітлено використання спектральних індексів та об'єктно-орієнтованого аналізу для моніторингу антропогенної трансформації ґрунтів. Обґрунтовано необхідність створення цілісної інфраструктури ґрунтових даних для забезпечення сталого землекористування.*

**Ключові слова:** ґрунт, дистанційне зондування Землі, ґрунтова інформаційна система, моніторинг ґрунтів, стале землекористування.

---

**Taras YAMELYNETS**, Doctor of Geographical Sciences,  
Professor of the Pedology and Soil Geography Department  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7058-0931>  
*Lviv Ivan Franko National University*  
79000, Lviv, 41 Doroshenko St., Ukraine

**Zinoviy PANKIV**, Doctor of Geographical Sciences,  
Professor, Head of the Pedology and Soil Geography Department  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6384-9541>  
Lviv Ivan Franko National University  
79000, Lviv, 41 Doroshenka St., Ukraine

**Andriy KYRYLCHUK**, Doctor of Geographical Sciences,  
Professor of the Pedology and Soil Geography Department  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3700-3331>  
Lviv Ivan Franko National University  
79000, Lviv, 41 Doroshenka St., Ukraine

**Oleksiy TELEGUZ**, Candidate of Geographical Sciences,  
Associate Professor of the Pedology and Soil Geography Department  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8779-8750>  
Lviv Ivan Franko National University  
79000, Lviv, 41 Doroshenka St., Ukraine

**Halyna IVANYUK**, Candidate of Geographical Sciences,  
Associate Professor of the Pedology and Soil Geography Department  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8585-7307>  
Lviv Ivan Franko National University  
79000, Lviv, 41 Doroshenka St., Ukraine

## METHODOLOGY OF REMOTE SENSING DATA INTEGRATION INTO REGIONAL SOIL INFORMATION SYSTEMS FOR SOIL MORPHOGENETIC PROPERTIES ANALYSIS AND LAND USE OPTIMIZATION

*The research addresses the fundamental scientific and practical problem of the qualitative discrepancy between outdated soil mapping materials and the contemporary needs of sustainable land management, precision agriculture, and environmental monitoring in Ukraine. In the context of global climate change and intensifying anthropogenic pressure, traditional soil survey methods, primarily based on periodic field descriptions and manual interpolation, no longer provide the necessary operational efficiency or spatial accuracy. The article presents a comprehensive methodology for the seamless integration of remote sensing data into the functional and logical architecture of regional soil information systems (SIS).*

*The theoretical foundation of the study is rooted in the concept of informational soil science, where soil is viewed as a complex, open, and multi-level natural system that acts as a global accumulator and translator of environmental and anthropogenic information. The author proposes a systemic approach to the formalization of soil data across three hierarchical levels: physical, logical, and semantic.*

*At the physical level of formalization, the research focuses on the primary processing of multispectral satellite imagery (specifically from the Sentinel-2 and Landsat-8/9 constellations). The core challenge at this stage is the transformation of raw digital numbers into physically correct surface reflectance coefficients. The study details the application of advanced atmospheric and radiometric correction algorithms, such as Sen2Cor and the 6S model, which minimize aerosol interference and water vapor distortion. This process is essential for establishing stable spectral signatures for various soil types, allowing for quantitative comparison in multi-temporal monitoring series.*

*The logical level of formalization involves the transformation of processed remote sensing data into thematic spectral indices that describe specific soil properties. The research highlights the significance of the Soil Brightness Index as a reliable predictor for soil organic matter content and erosion degradation. For areas with sparse or emerging vegetation, the study emphasizes the necessity of the Soil Adjusted Vegetation Index, which incorporates a soil-background correction factor. Within the SIS architecture, these indices function as independent variables in complex predictive models. The methodology demonstrates a synergistic effect when multispectral indices are combined with high-resolution digital elevation models. By calculating morphometric parameters such as slope, aspect, profile curvature, and the Topographic Wetness Index, the SIS can account for the catenary variability of soils, significantly improving the accuracy of soil boundary delineation by up to 35-40% compared to traditional manual methods.*

*At the semantic level, the research formalizes the translation of genetic soil science categories into formal digital codes and classifiers compatible with relational database management systems. To ensure international compatibility, the study adopts the World Reference Base for Soil Resources (WRB) nomenclature. The methodology utilizes Object-Based Image Analysis to segment satellite imagery into logical landscape units, so called elementary soil areas. This approach minimizes the subjectivity of the cartographer and allows for the automated identification of soil units based on their shape, texture, and spatial context.*

*A significant portion of the material is dedicated to the practical application of remote sensing data in the diagnosis of specific soil properties, such as humus content, acidity (pH), and the state of peatlands. Based on empirical*

research conducted in the Lviv region (specifically the Busk district), the author establishes a stable inverse correlation between soil organic matter and spectral brightness: higher humus concentrations result in lower integral reflectance. Furthermore, the study explores the possibility of indirect soil pH diagnosis through indicator vegetation states and micro-relief features detectable in multi-spectral Sentinel-2 bands.

The research also details the architectural implementation of a regional SIS using open-source GIS platforms (specifically QGIS). The database is structured on the principle of hierarchical integrity: "soil point – profile – genetic horizon – analytical attribute." A key innovation presented is the integration of an "historical layer", such as digitized legacy soil surveys from the mid-20th century. This allows for a robust retrospective analysis, enabling the system to identify long-term trends in soil de-humification, erosion, and anthropogenic transformation over the last four decades using the Landsat satellite archive.

The application of machine learning algorithms, such as Random Forest and Support Vector Machines, within a cloud computing environment (Google Earth Engine) is analyzed as a pathway toward SIS "third-generation" systems. These network-based systems provide real-time processing of Big Data, transforming soil science into a predictive discipline capable of modeling soil evolution scenarios under various climate and farming scenarios.

The economic and practical implications of the developed SIS are substantial. Automated soil quality assessment (bonitation) and land valuation based on high-precision digital models reduce administrative costs and ensure transparency in land relations. For the agricultural sector, the integrated SIS structure serves as the foundational infrastructure for precision agriculture, enabling differentiated fertilizer application based on the actual spectral heterogeneity of soil units.

In conclusion, the integration of remote sensing data into SIS structures represents the primary methodology for the digital transformation of modern soil science. The study demonstrates that the symbiosis of remote sensing and GIS creates a reliable foundation for a national soil data infrastructure, which is critical for Ukraine's post-war agricultural recovery, environmental security, and sustainable land capital management in the 21st century.

**Keywords:** soil, remote sensing, soil information system, soil monitoring, sustainable land use.



**Постановка науково-практичної проблеми.** Сучасний стан ґрунтового покриву України характеризується прогресуючими деградаційними процесами, що зумовлено інтенсивним сільськогосподарським використанням і недостатнім рівнем системного державного моніторингу в останні десятиліття. Основна науково-практична проблема полягає у критичній невідповідності між наявною застарілою ґрунтово-картографічною базою, створеною переважно в середині ХХ століття та реальними потребами сучасного агровиробництва, екологічного менеджменту та земельного кадастру. Існуючі традиційні методи збору даних, які базуються на періодичних польових обстеженнях, є надзвичайно трудомісткими, дорогими та не дають змоги фіксувати динамічні зміни властивостей ґрунтів у режимі реального часу. Це створює ситуацію «інформаційного вакууму», коли важливі управлінські рішення приймаються на основі неактуальних, або занадто генералізованих даних. Наслідком цього є неефективне використання добрив, посилення водної та вітрової ерозій, втрата ґрунтової родючості та порушення екологічного балансу агроландшафтів. Подолання цієї фундаментальної проблеми вимагає розробки та впровадження інноваційної методології, яка б дала змогу безшовно інтегрувати дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у структуру сучасних ґрунтових інформаційних систем (ГрІС), трансформуючи їх із пасивних архівів

у динамічні інтелектуальні моделі моніторингу та прогнозування.

**Актуальність і новизна дослідження.** Актуальність теми зумовлена необхідністю виконання міжнародних зобов'язань України щодо впровадження європейських стандартів у галузі охорони ґрунтів і розвитку національної інфраструктури просторових даних. В умовах гострого дефіциту фінансування масштабних наземних обстежень, використання супутникових даних Sentinel та Landsat стає фактично єдиним економічно виправданим шляхом для отримання суцільного покриття території актуальною ґрунтознавчою інформацією. Наукова новизна дослідження полягає у розробці комплексного алгоритму трирівневої формалізації ґрунтових даних, а саме: фізичної, логічної та семантичної, що функціонує у межах єдиної регіональної ГІС. Уперше запропоновано методіку поєднання ретроспективного аналізу космічних знімків за останні 40 років із сучасними об'єктно-орієнтованими методами аналізу зображень для детекції різних фаз ґрунтової деградації. Новизна також охоплює розроблені архітектурні рішення побудови реляційних баз даних, які інтегрують цифрові спектральні профілі з морфологічними описами ґрунтових розрізів, що відкриває шлях до так званого дистанційного картографування властивостей ґрунту на великих територіях без необхідності масштабних польових досліджень.

**Зв'язок теми статті з важливими нау-**

ково-практичними завданнями. Дослідження безпосередньо пов'язані із реалізацією Закону України «Про національну інфраструктуру просторових даних» і Стратегії сталого розвитку України до 2030 року та відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в частині раціонального природокористування, цифровізації аграрного сектору та розбудови «цифрової держави». Практична значущість результатів полягає у створенні наукового підґрунтя для розробки регіональних програм охорони ґрунтів, автоматизації процесів нормативної грошової оцінки земель і бонітування ґрунтів. Результати роботи є частиною ширшого циклу фундаментальних досліджень у галузі інформаційного ґрунтознавства, зокрема в рамках виконання науково-дослідної роботи «Ґрунтово-земельні ресурси Західного регіону України» (2023-2025 рр., номер державної реєстрації НДР: 0123U101521), що реалізується кафедрою ґрунтознавства і географії ґрунтів Львівського національного університету імені Івана Франка.

**Аналіз останніх публікацій за темою дослідження** Фундаментальні засади представленого дослідження закладені у працях С. П. Позняка, З. П. Паньківа, І. Я. Папіша, Красехи Є.Н., Кіта М.Г. [1-7]. Теоретичні підходи до концепції цифрового картографування ґрунтів (Digital Soil Mapping) у міжнародній практиці найбільш повно розкриті у роботах А. Макбратні та Б. Мінасі [26], які запропонували математичну модель *scorpan*, де дані дистанційного зондування є ключовими варіантами. Важливий внесок у розробку методів цифрової педометрії та автоматизації картографування зробили також П. Лагашері, М.Елісе та М. Вольц [24; 28].

Питання використання спектральних властивостей ґрунтів для діагностики їхніх показників досліджували Т. Блашке [15], К. Омута та Р. Варгас [29; 30], чії розробки щодо спектральних індексів стали базою для сучасних ГІС-алгоритмів. Розуміння ґрунту як складного інформаційного ресурсу ґрунтується на працях А. Маккола [27] та П. Обаде [16]. У вітчизняній науці напрям нагромадження та формалізації регіональних даних активно розвивався у роботах В. Г. Гаськевича, Г. С. Іванюк, А. А. Кирильчука, З. П. Паньківа, М. Г. Кіта та інших [1-7; 21; 23; 33-35].

На сучасному етапі світова спільнота зосереджена на створенні глобальних ґрунтових інформаційних систем. Проект SOTER (Global Soil and Terrain Database) [37], ініційований FAO, UNEP та ISRIC, заклав методологічні ос-

нови стандартизації форматів цифрових карт. Розвиток цих ідей простежується у проєктах GlobalSoilMap, e-SOTER, Harmonized World Soil Database які використовують Інтернет-технології для надання доступу до ґрунтових даних у реальному часі [19; 39]. У Європі ці питання координуються в межах проєкту ESDB (European Soil Database) та директиви INSPIRE, що вивчається у працях Д. Россітера [32] та А. Хартемінка [20].

Окремо слід відзначити дослідження К. Омута та Р. Рохаса [29] щодо інтеграції ДЗЗ і педометрії для оцінки деградації земель. Питання об'єктно-орієнтованого аналізу зображень для ґрунтових цілей детально розкрито Т. Блашке [15]. В Україні впровадження систем третього покоління та реляційних баз даних «Властивості ґрунтів України» координується ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» [10]. Попри ці здобутки, архітектура регіональних ГІС, що забезпечує безшовну інтеграцію мультиспектральних потоків ДЗЗ у середовищі відкритого ПЗ (наприклад, QGIS) потребує подальшого методологічного обґрунтування [12; 32; 36].

**Виклад основного матеріалу.** Методологія побудови сучасної регіональної ґрунтової інформаційної системи ґрунтується на концептуальних засадах інформаційного ґрунтознавства, де ґрунт розглядається як складна, відкрита та багаторівнева система акумуляції, зберігання та передачі інформації. Ґрунт виступає не лише природним тілом, але й цілісною інформаційною моделлю, яка містить дані про всі етапи планетарного та ландшафтного розвитку [11; 12]. Для ефективної обробки цієї інформації в межах автоматизованих систем необхідно застосовувати суворий системний підхід до її формалізації. Процес перетворення розрізних ґрунтових даних у структуровану цифрову модель передбачає виділення трьох основних рівнів формалізації: фізичного, логічного та семантичного.

Фізичний рівень формалізації безпосередньо пов'язаний із отриманням і первинною обробкою сигналів, які надходять від ґрунтової поверхні. У цьому контексті дані дистанційного зондування Землі стають провідним і незамінним джерелом вхідної інформації. Сенсори космічних апаратів, таких як Sentinel-2 та Landsat, фіксують інтенсивність відбитого електромагнітного випромінювання у різних спектральних діапазонах. Кожен піксель зображення несе інформацію про спектральну яскравість поверхні, яка на фізичному рівні суттєво залежить від мінералогічного складу, вмісту

гумусу, вологості та структури ґрунту. Процедура перетворення цифрових значень у фізично коректні коефіцієнти відбиття вимагає застосування складних алгоритмів атмосферної та радіометричної корекції. Використання моделей Sen2-Cog або 6S дає змогу отримати стандартизовані дані, придатні для кількісного порівняння та багаторічного моніторингу [16; 30]. Важливою складовою фізичного рівня є створення «спектральних образів» ґрунтів, які стають основою для їх автоматизованого розпізнавання у багатовимірному спектральному просторі.

Логічний рівень формалізації спрямований на побудову внутрішньої структури даних і встановлення ієрархічних взаємозв'язків між об'єктами. У ГІС-середовищі це реалізується через розробку архітектури реляційних баз даних. Структура ґрунтової інформаційної системи повинна адекватно відображати ієрархічну організацію ґрунтового тіла: від ландшафтної структури регіону до окремого генетичного горизонту в розрізі. Кожен просторовий об'єкт у системі пов'язаний із набором атрибутів, які описують його фізичні та хімічні властивості. На логічному рівні дані ДЗЗ трансформуються у тематичні спектральні індекси, такі як індекс яскравості, індекс вологості або вегетаційні індекси. Ці індекси виступають незалежними предикторами у математичних моделях, які дають змогу прогнозувати просторову варіабельність ґрунтових характеристик на недосліджених ділянках [16; 31; 36]. Інтеграція цифрових моделей рельєфу на цьому рівні дає змогу враховувати фундаментальний геоморфологічний контекст ґрунтоутворення. Рельєф як фактор-перерозподілювач речовини та енергії визначає вектори міграції поживних речовин, гумусу та вологи, що відображається у морфометричних параметрах: крутизні схилів, експозиції та індексі топографічної вологості [5; 13; 36].

Особливе місце у структурі сучасних ГІС посідає безпосереднє використання даних дистанційного зондування як найбільш оперативного джерела інформації. Методологія застосування ДДЗ у ґрунтознавстві ґрунтується на принципах вибіркового відбиття електромагнітних хвиль різними типами ґрунтів. Процес дешифрування аеро- та космічних знімків для цілей картографування традиційно поділяється на два взаємопов'язані етапи: контурне та генетичне дешифрування. Контурне дешифрування забезпечує високу геометричну точність проведення границь між різними ґрунтовими відмінами, що особливо важливо для територій

із високою строкатістю ґрунтового покриття та складним рельєфом. Генетичне дешифрування, своєю чергою, дає змогу встановити якісний ґрунтовий зміст виділеного контуру, ґрунтуючись на аналізі ландшафтних індикаторів і прямих спектральних ознак відбиття [30; 31; 36].

Ефективність використання ДДЗ безпосередньо залежить від розуміння фізичних заasad спектральної відбивної здатності ґрунтів. Кожний тип ґрунту має свій унікальний спектральний образ, який формується під домінуючим впливом вмісту органічної речовини, вологості, мінералогічного складу й агрегатного стану поверхні. Одним із найбільш значущих параметрів, який піддається прецизійній дистанційній діагностиці, є вміст гумусу. Дослідженнями встановлено стійку обернену кореляційну залежність між вмістом гумусу й яскравістю ґрунту: чим вища концентрація органічної речовини у верхньому діагностичному горизонті, тим темнішим є фототон знімка, і тим нижчим є інтегральний коефіцієнт відбиття у видимій частині спектра. Це дає змогу за допомогою ГІС-інструментарію створювати детальні цифрові карти просторового розподілу гумусу на основі регресійних моделей, які пов'язують оптичну щільність зображення із верифікованими даними наземних лабораторних аналізів [24; 26; 36].

Аналіз практичного досвіду дешифрування, зокрема на прикладі ґрунтового покриття Львівської області, демонструє, що ДДЗ дає змогу ідентифікувати не лише типи ґрунтів, а й їхні важливі фізико-хімічні властивості, такі як кислотність (pH). Хоча величина pH не має прямого вираженого спектрального взаємозв'язку, вона проявляється через стан природної та культурної рослинності (індикаційне дешифрування) та специфічні мікроформи рельєфу, що чітко фіксуються на знімках високої роздільної здатності. Використання багатоспектральних знімків Sentinel-2 надає можливість розраховувати систему індексів, які описують стан залізистих сполук, карбонатів, різних мінералів, глин тощо, які виступають непрямими ознаками рівня кислотності ґрунтового розчину.

Методика роботи з ДДЗ у структурі ГІС передбачає суворе дотримання чотирьох фундаментальних принципів дешифрування. Перший принцип стосується врахування спектральної відбивної здатності об'єкта у різних зонах спектра (видимій, ближній і середній інфрачервоній). Другий принцип полягає у використанні часової динаміки (мультитемпоральний аналіз), що дає змогу чітко відрізнити вла-

сне ґрунтові ознаки від сезонних змін рослинного покриву. Третій принцип стосується ландшафтної індикації, де ґрунт розглядається як невід'ємна частина геосистеми, що чітко пов'язана з мезо- та мікрорельєфом і умовами зволоження. Четвертий принцип полягає у автоматизованій класифікації з використанням алгоритмів машинного навчання, що забезпечує перехід від суб'єктивного візуального аналізу до математично обґрунтованого виділення елементарних ґрунтових ареалів (ЕГА) [36; 39; 40].

Сучасні ГІС-технології дають змогу інтегрувати ДДЗ із векторизованими ретроспективними даними. Наприклад, використання програмного середовища QGIS або ArcGIS дає змогу накласти сучасні наддетальні космічні знімки на оцифровані архівні карти ґрунтових обстежень 1960-х років. Це створює унікальні умови для проведення порівняльного просторово-часового аналізу та виявлення зон інтенсивної трансформації ґрунтів під впливом осушувальної меліорації, або багаторічного інтенсивного обробітку. Зокрема, встановлено, що інтеграція ДДЗ дає змогу суттєво уточнити межі торфових ґрунтів і зон їхньої антропогенної спрацьованості, які часто відображені на старих аналогових картах як повноцінні торфовища, хоча в реальності вони вже давно перетворилися на торфово-мінеральні, або повністю деградовані ґрунти [40].

Для підвищення достовірності результатів у ГІС застосовується комп'ютерне дешифрування на основі аналізу гістограм спектральної яскравості. Використання методів математичної фільтрації та покращення зображень дає змогу ефективно виокремити власне ґрунтову складову спектрального сигналу навіть за наявності часткового рослинного покриву або залишків стерні. Надзвичайно важливим етапом є розрахунок індексів відкритого ґрунту, які ґрунтуються на аналізі короткохвильових інфрачервоних каналів. Це дає змогу в автоматичному режимі виділяти контури еродованих ґрунтів на схилі землях, де яскравість ілювіальних і материнських горизонтів, які виходять на поверхню внаслідок змиву, суттєво відрізняється від модальних профілів чорноземів, або сірих лісових ґрунтів [31; 39].

Варто також наголосити на критичній важливості вибору оптимальних термінів зйомки для ДДЗ. Найбільш інформативними для фундаментальних ґрунтознавчих досліджень є періоди, коли ґрунтова поверхня максимально вільна від вегетуючої рослинності (після оранки, або безпосередньо перед сівою) та пере-

буває у стані помірного рівноважного зволоження. Аналіз знімків у ранній весняний період дає змогу зафіксувати мікрорельєфну неоднорідність і особливості мікродиференціації вологи, що є ключем до розуміння процесів перерозподілу солей, карбонатів і гумусу. Використання радарних даних, зокрема місії Sentinel-1, у поєднанні з оптичними ДДЗ дає змогу здійснювати моніторинг вологості ґрунтів навіть в умовах суцільної хмарності, що є критично важливим наприклад для таких регіонів як Полісся та Передкарпаття.

Формалізація результатів дешифрування у ГІС реалізується через створення багатопланових цифрових баз даних, де кожен контур має вичерпне атрибутивне наповнення. Така інтегрована система стає надійною основою для побудови складних моделей сталого землекористування. Використання ДДЗ дає змогу кардинально відійти від точкового опису окремих розрізів до суцільного картографування реальних властивостей ґрунтів, що є необхідною передумовою для реального переходу до точного землеробства [6; 40]. Це забезпечує можливість прецизійного диференційованого внесення мінеральних добрив і вапна, виходячи з реальної просторової неоднорідності кожного конкретного поля.

Семантичний рівень формалізації забезпечує інтелектуальну інтерпретацію отриманих цифрових даних і їх наповнення науковим ґрунтознавчим змістом. Він передбачає встановлення чітких правил перекладу понять класичного ґрунтознавства на мову формальних кодів, сумісних із СУБД. Для забезпечення глобальної сумісності регіональних систем із мережами SOTER або GlobalSoilMap необхідно використовувати міжнародні стандарти, зокрема Світову реферативну базу ґрунтових ресурсів (WRB) [38; 41]. Використання об'єктно-орієнтованого аналізу зображень дає змогу ГІС сегментувати простір на логічні одиниці, що відповідають реальним ґрунтовим ареалам, враховуючи не лише їхній спектр, але й морфометрію, текстуру та топологічне сусідство об'єктів [39; 40].

Архітектурно регіональна ГІС Львівської області ґрунтується на використанні відкритого програмного забезпечення (QGIS), що забезпечує гнучкість і безкоштовність. База даних організована за принципом ієрархічної цілісності: «ґрунтова точка – розріз – генетичний горизонт – лабораторний аналіз». Відповідно до стандартів формалізації, розроблених авторами [11; 12], кожному об'єкту в ГІС відповідає унікальний ідентифікатор, що надійно по-

в'язує геометрію (вектор або растр) із атрибутивною таблицею властивостей. Інтеграція хмарних технологій, таких як Google Earth Engine, відкриває безпрецедентні можливості для обробки Big Data, даючи змогу аналізувати терабайти супутникової інформації безпосередньо на віддалених серверах.

Правове регулювання ґрунтової інформації в системі ГІС є невід'ємною та критично важливою складовою її сталого функціонування. Згідно з концепцією інформаційного ґрунтознавства, дані про ґрунти мають статус стратегічного ресурсу держави, необхідного для забезпечення продовольчої та екологічної безпеки [6; 21]. Архітектура системи повинна суворо відповідати вимогам Директиви INSPIRE та національного законодавства про інфраструктуру просторових даних. Створення відкритих мережесих інтерфейсів (Web-GIS) забезпечує оперативний доступ до актуальних ґрунтових моделей для всіх законних учасників земельних відносин, сприяючи розвитку цивілізованого ринку землі на прозорій, науково обґрунтованій основі.

Економічна ефективність та практичне впровадження інтегрованих систем ДЗЗ з ГІС на регіональному рівні вже не викликає сумнівів. Автоматизація розрахунків нормативної грошової оцінки та бонітування на основі точних цифрових моделей дає змогу уникнути суб'єктивізму, корупційних ризиків і значно скоротити витрати бюджету на адміністрування земельних ресурсів [6]. Для сучасного агровиробництва ГІС виступає як інтелектуальна база для підвищення рентабельності за рахунок оптимізації ресурсів. Синергія космічних методів та ГІС-аналізу дає змогу не лише констатувати наявний стан, а й математично моделювати сценарії еволюції ґрунтів під впливом різних систем землеробства та кліматичних змін.

Подальші перспективи розвитку методології нерозривно пов'язані з впровадженням методів спектральної зйомки, яка дає змогу фіксувати сотні вузьких спектральних каналів. Це відкриває шлях до прямої дистанційної ідентифікації мінералогічного складу ґрунту, вмісту конкретних форм вуглецю та виявлення локальних забруднювачів (важких металів, пестицидів). Інтеграція таких детальних даних у ГІС піднесе ґрунтознавство на рівень фундаментальної прогнозної науки XXI століття. Отже, симбіоз ДЗЗ та ГІС створює надійний фундамент для побудови сучасної цифрової інфраструктури, яка забезпечить сталий розвиток аграрного сектору, екологічну безпеку та збереження ґрунтового капіталу України для

майбутніх поколінь.

**Висновки.** Інтеграція даних дистанційного зондування Землі у структуру ГІС є ключовим і стратегічно необхідним шляхом трансформації сучасного ґрунтознавства в передову інформаційну дисципліну. Розроблена методологія тривірневої формалізації даних (фізичної, логічної та семантичної) дає змогу успішно подолати статичність і суб'єктивність традиційних методів і забезпечити якісно новий рівень оперативного моніторингу ґрунтового покриву. Створення реляційних баз даних, які безшовно поєднують детальні наземні морфологічні описи зі спектральними «цифровими відбитками» ДЗЗ, забезпечує високу достовірність предиктивних ґрунтових моделей. Використання об'єктно-орієнтованого аналізу зображень у поєднанні з прецизійними цифровими моделями рельєфу дає змогу значно підвищити точність проведення меж ґрунтових контурів, виявити латентні деградаційні процеси й ідентифікувати зони прихованої ерозії, які непомітні при візуальному огляді. Таким чином, симбіоз ДЗЗ і ГІС створює надійний фундамент для побудови цифрової інфраструктури ґрунтових даних, що є критично важливим для забезпечення національної безпеки та сталого розвитку країни.

Проведене дослідження підтверджує, що впровадження інтелектуальних геоінформаційних технологій дає змогу не лише надійно зберігати та систематизувати колосальні обсяги накопичених знань, а й генерувати принципово нові наукові знання через складний багатофакторний аналіз просторових взаємозв'язків. Перехід до цифрового картографування на основі ДЗЗ забезпечує суцільність, безперервність і прозорість ґрунтового моніторингу. ГІС може стати центральною, інтегруючою ланкою, яка об'єднає теоретичні засади генетичного ґрунтознавства із нагальними практичними потребами землекористувачів і держави. Це створює передумови для реального, а не формального впровадження принципів сталого розвитку в аграрному секторі, де охорона ґрунтів ґрунтується на точних кількісних даних і вчасному виявленні негативних тенденцій. Створення регіональних ГІС є неминучим етапом на шляху до формування єдиного державного земельного кадастру нового покоління, де ґрунтова інформація буде виступати ключовим фактором об'єктивної оцінки та стратегічного управління земельним капіталом країни. Поєднання алгоритмів машинного навчання, Big Data та хмарних обчислень перетворює ґрунтознавство на потужну прогнозу

науку, здатну ефективно реагувати на глобальні виклики майбутнього.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Результати дослідження можуть бути використані органами державної виконавчої влади та місцевого самоврядування для розробки та корегування стратегій раціонального землекористування, територіального планування та охорони ґрунтів. Методологічні розробки щодо архітектури регіональних ґрунтових ГІС можуть стати основою для створення національного веб-порталу ґрунтових ресурсів країни. Для аграрного сектору результати відкривають широкі можливості впровад-

ження систем точного землеробства, що забезпечить стабільне зростання врожайності при суттєвому зниженні собівартості продукції й екологічних ризиків. Подальші наукові пошуки будуть сфокусовані на впровадженні методів гіперспектрального зондування, радарної інтерферометрії та розвитку моделей штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання ґрунтових горизонтів за їхніми цифровими спектральними профілями, що остаточно підніме інформаційне ґрунтознавство на рівень важливої прикладної науки.

#### Література:

1. Папіш І. Я, Позняк С. П., Іванюк Г. С., Ямелинець Т. С. Ґрунтово-географічне районування Українського Полісся. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка. Серія: Географія. Тернопіль: СМП «Тайп», 2016. №2 (випуск 41). С. 31–42.
2. Папіш І. Я, Позняк С. П., Іванюк Г. С., Ямелинець Т. С. Ґрунтово-географічне районування широколистяно-лісової ґрунтово-біокліматичної зони України. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка. Серія: Географія. – Тернопіль: СМП «Тайп», 2019. №1 (випуск 46). С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.19.2.4>
3. Позняк С.П. Ґрунтознавство і географія ґрунтів: підручник. У двох частинах. Ч. 1. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2010. 270 с.
4. Позняк С.П., Красеха Є.Н. Ґрунтово-географічні дослідження (понятійно-термінологічний словник). Львів-Одеса: «Простір М», 1999. 96 с.
5. Позняк С.П., Красеха Є.Н., Кіт М.Г. Картографування ґрунтового покриву: Навчальний посібник. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2003. 500 с.
6. Позняк С. П., Паньків З. П., Ямелинець Т. С., Гавриш Н. С. Інвестиційна привабливість ґрунтів Карпатського регіону України. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.01.026> Український географічний журнал. №1 (109). 2020. С. 26-34
7. Позняк С. П., Папіш І. Я, Іванюк Г. С., Ямелинець Т. С. Ґрунтово-географічне районування Львівської обл.: структура та принципи. Вісник Львівського ун-ту. Серія географічна. Львів: Вид-во Львів. ун-ту, 2017. Вип. 52. С. 251–256.
8. Ямелинець Т. С. Історичні етапи формалізації ґрунтових даних і трансформація ґрунтової карти як інформаційної моделі даних про ґрунт. Наукові записки Тернопільського нац. пед. ун-ту імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія. 2020. № 1 (вип. 48). С. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.4>
9. Ямелинець Т. С. Ерозійна деградація сірих лісових ґрунтів та взаємозв'язок з іншими типами деградації в межах Західного регіону України. Вісник Львівського ун-ту. Серія географічна. Вип. 44. Львів. 2003. С. 388-397.
10. Ямелинець Т. С. Аналіз сучасних ґрунтових інформаційних систем і баз даних ґрунтів країн світу. Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки. 2020. Т. 22, Вип. 1. С. 126-137.
11. Ямелинець Т. С. Інформаційна модель ґрунту як базова одиниця інформаційного ґрунтознавства. Наукові записки Тернопільського нац. пед. ун-ту імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія. 2020. № 2 (вип. 49). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.2.6>
12. Ямелинець Т. С. Теоретичні основи наукового напряму інформаційного ґрунтознавства. Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2020. С. 78-89.
13. Ямелинець Т. С., Телегуз О. Г. Застосування ГІС при дослідженні впливу геоморфологічного чинника на потенційну ерозійну небезпеку сірих лісових ґрунтів Західного лісостепу України. Наукові записки Тернопільського нац. пед. ун-ту імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія. 2012. № 2 (вип. 32). С. 33–40.
14. Batjes, N. H. (2016). Overview of procedures and standards in use at ISRIC WDC-Soils. Report 2016/02, ISRIC–World Soil Information, Wageningen (doi:10.17027/isric-wdcsoils. 20160004). ISRIC.Report,2,5.
15. Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 65(1), 2-16.
16. de Paul Obade, V., & Lal, R. (2013). Assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems (GIS). Catena, 104, 77-92.
17. Delaney, J., & Van Niel, K. (1999). Geographical information systems: an introduction (pp. 194-194). Oxford, UK: Oxford University Press.
18. Getis, A., Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographic Analysis, 24(3), pp. 189–206.
19. Harmonized World Soil Database v 1.2 [Електронний ресурс]: офіційний сайт. - Режим доступу: <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/> (дата звернення 11.09.2025).
20. Hartemink, Alfred & Krasilnikov, Pavel & Bockheim, James. (2013). Soil maps of the world. Geoderma. s 207–208. 10.1016/j.geoderma.2013.05.003.
21. Ivanyuk, H., Yamelynets, T., Papish, I., Hnativ, P., Pankiv, Z., Bonishko, O., Ivaniuk, V., Haskevych, O., Baranskiy, 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>
22. ISRIC - World Soil Information [Електронний ресурс]: офіційний сайт. - Режим доступу: <http://isric.org> (дата звернення 20.01.2026).

23. Kyrylchuk A., Pankiv Z., Demchychyn A. Ecological and agrochemical condition of soils of L'viv region of Ukraine as a basis of their investment attractiveness. *European Journal of Science and Technology, Special Issue 28*, pp. 837-842, November 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011396>
24. Lagacherie P., McBratney A., Voltz M. *Digital soil mapping: An introductory perspective*. Elsevier, Amsterdam, 2006. - 350 p.
25. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
26. McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
27. McCall A. (1931). *The Development of Soil Science*. *Agricultural History*, 5(2), 43-56. Retrieved May 2, 2020, from [www.jstor.org/stable/3739426](http://www.jstor.org/stable/3739426)
28. McEliece, R. J. (2004). *The theory of information and coding* (No. 86). Cambridge University Press. 93 p.
29. Omuto C., Nachtergaele F., Rojas R.V., 2013. State of the art report on global and regional soil information: Where are we? Where to go? *Global Soil Partnership Technical Report*. FAO, Rome. 70 p.
30. Omuto C.T., Vargas R.R. 2009. Combining pedometrics, remote sensing and field observations for assessing soil loss in challenging Drylands: a case study of northwestern Somalia. *Land Degradation Development* 20: 101-115
31. Richards, J. A. (2022). Interpreting images. In *Remote sensing digital image analysis* (pp. 87-106). Cham: Springer International Publishing.
32. Rossiter D.G. Digital soil resource inventories: status and prospects // *Soil Use and Management*, 2004. V. 20, Issue 3. - Pp. 296-30.
33. 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>
34. Pankiv, Z. P., Yamelynets T. S. Ferrum concretions forms in the mollic gley soils of Low (Male) Polissya. *Polish Journal of Soil Science* 53 (1), 137-149
35. 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>
36. Prost, G. L. (2025). *Remote sensing for geoscientists: image analysis and integration*. CRC Press.
37. SOTER (база даних про ґрунти і рельєф) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://esdac.jrc.ec.europa.eu> (дата звернення 03.02.2026).
38. *World reference base for soil resources*. - Rome: IUSS, ISRIC, FAO, 2014. - 133 p.
39. Wulf, H., Mulder, T., Schaepman, M. E., Keller, A., Jörg, P. C., & Schaepman, M. E. (2015). *Remote sensing of soils*. Remote Sensing Laboratories, University of Zurich: Zürich, Germany.
40. Yuzugullu, O., Lorenz, F., Fröhlich, P., & Liebisch, F. (2020). Understanding fields by remote sensing: Soil zoning and property mapping. *Remote Sensing*, 12(7), 1116.
41. Zádorová, T., Skála, J., Žížala, D., Vaněk, A., & Penížek, V. (2021). Harmonization of a large-scale national soil database with the World Reference Base for Soil Resources 2014. *Geoderma*, 384, 114819.

#### References:

1. Papish I. Ya, Pozniak S. P., Ivaniuk H. S., Yamelynets T. S. Gruntovo-heohrafichne raionuvannya Ukrainського Polissia. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu im. V. Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*. Ternopil: SMP «Taip», 2016. №2 (vypusk 41). S. 31–42.
2. Papish I. Ya, Pozniak S. P., Ivaniuk H. S., Yamelynets T. S. Gruntovo-heohrafichne raionuvannya shyrokolystiano-lisovoi gruntovo-bioklimatychnoi zony Ukrainy. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu im. V. Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*. – Ternopil: SMP «Taip», 2019. – №1 (vypusk 46). – S. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.19.2.4>
3. Pozniak S.P. *Gruntoznavstvo i heohrafiia gruntiv: pidruchnyk. U dvokh chastynakh. Ch. 1*. Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 2010. 270 s.
4. Pozniak S.P., Krasiekha Ye.N. *Gruntovo-heohrafichni doslidzhennia (poniatiino-terminolohichni slovnky)*. Lviv-Odesa: «Prostir M», 1999. 96 s.
5. Pozniak S.P., Krasiekha Ye.N., Kit M.H. *Kartohrafuvannya gruntovoho pokryvu: Navchalnyi posibnyk*. Lviv: Vydavnychiy tsentr LNU imeni Ivana Franka, 2003. 500 s.
6. Pozniak S. P., Pankiv Z. P., Yamelynets T. S., Havrysh N. S. Investytsiina pryvablyvist gruntiv Karpatskoho rehionu Ukrainy. <https://doi.org/10.15407/uzg2020.01.026> *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*. №1 (109). 2020. S. 26-34
7. Pozniak S. P., Papish I. Ya, Ivaniuk H. S., Yamelynets T. S. Gruntovo-heohrafichne raionuvannya Lvivskoi obl.: struktura ta pryntsyipy. *Visnyk Lvivskoho un-tu. Serii heohrafichna*. Lviv: Vyd-vo Lviv. un-tu, 2017. Vyp. 52. S. 251–256.
8. Yamelynets T. S. Istorychni etapy formalizatsii gruntovykh danykh i transformatsiia gruntovoi karty yak informatsiinoi modeli danykh pro grunt. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho nats. ped. un-tu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*. 2020. № 1 (vyp. 48). S. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.4>
9. Yamelynets T. S. Eroziina dehradatsiia sirykh lisovykh gruntiv ta vzaiemozviazok z inshymy typamy dehradatsii v mezhakh Zakhidnoho rehionu Ukrainy. *Visnyk Lvivskoho un-tu. Serii heohrafichna*. Vyp. 44. Lviv. 2003. S. 388-397.
10. Yamelynets T. S. Analiz suchasnykh gruntovykh informatsiinykh system i baz danykh gruntiv krain svitu. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Heohrafichni ta heolohichni nauky*. 2020. T. 22, Vyp. 1. S. 126-137.
11. Yamelynets T. S. Informatsiina model gruntu yak bazova odyntysia informatsiinoho gruntoznavstva. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho nats. ped. un-tu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*. 2020. № 2 (vyp. 49). S. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.2.6>
12. Yamelynets T. S. Tretychni osnovy naukovoho napriamu informatsiinoho hrutoznavstva. *Problemy heomorfolohii i paleoheohrafii Ukrainykh Karpat i prylyhlykh terytorii*. 2020. S. 78-89.
13. Yamelynets T. S., Telehuz O. H. Zastosuvannya HIS pry doslidzhenni vplyvu heomorfolohichnoho chynnyka na potentsiinu eroziinu nebezpeku sirykh lisovykh hruntiv Zakhidnoho lisostepu Ukrainy. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho nats. ped. un-tu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*. 2012. № 2 (vyp. 32). S. 33–40.
14. Batjes, N. H. (2016). Overview of procedures and standards in use at ISRIC WDC-Soils. Report 2016/02, ISRIC–World Soil

- Information, Wageningen (doi:10.17027/isric-wdcsoils.20160004). ISRIC.Report,2,5.
15. Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 65(1), 2-16.
  16. de Paul Obade, V., & Lal, R. (2013). Assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems (GIS). Catena, 104, 77-92.
  17. Delaney, J., & Van Niel, K. (1999). Geographical information systems: an introduction (pp. 194-194). Oxford, UK: Oxford University Press.
  18. Getis, A., Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographic Analysis, 24(3), pp. 189–206.
  19. Harmonized World Soil Database v 1.2 [Elektronnyi resurs]: ofitsialnyi sait. - Rezhym dostupu: <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/> (data zvernennia 11.09.2025).
  20. Hartemink, Alfred & Krasilnikov, Pavel & Bockheim, James. (2013). Soil maps of the world. Geoderma. s 207–208. 10.1016/j.geoderma.2013.05.003.
  21. 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>
  22. ISRIC - World Soil Information [Elektronnyi resurs]: ofitsialnyi sait. - Rezhym dostupu: <http://isric.org> (data zvernennia 20.01.2026).
  23. Kyrylchuk A., Pankiv Z., Demchychyn A. Ecological and agrochemical condition of soils of Lviv region of Ukraine as a basis of their investment attractiveness. European Journal of Science and Technology, Special Issue 28, pp. 837-842, November 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011396>
  24. Lagacherie P., McBratney A., Voltz M. Digital soil mapping: An introductory perspective. Elsevier, Amsterdam, 2006. - 350 p.
  25. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
  26. McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. Geoderma 117, 3–52.
  27. McCall A. (1931). The Development of Soil Science. Agricultural History, 5(2), 43-56. Retrieved May 2, 2020, from [www.jstor.org/stable/3739426](http://www.jstor.org/stable/3739426)
  28. McEliece, R. J. (2004). The theory of information and coding (No. 86). Cambridge University Press. 93 p.
  29. Omuto C., Nachtergaele F., Rojas R.V., 2013. State of the art report on global and regional soil information: Where are we? Where to go? Global Soil Partnership Technical Report. FAO, Rome. 70 p.
  30. Omuto C.T., Vargas R.R. 2009. Combining pedometrics, remote sensing and field observations for assessing soil loss in challenging Drylands: a case study of northwestern Somalia. Land Degradation Development 20: 101-115
  31. Richards, J. A. (2022). Interpreting images. In Remote sensing digital image analysis (pp. 87-106). Cham: Springer International Publishing.
  32. Rossiter D.G. Digital soil resource inventories: status and prospects. Soil Use and Management, 2004. V. 20, Issue 3. - Pp. 296-30.
  33. 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>
  34. Pankiv, Z. P., Yamelynets T. S. Ferrum concretions forms in the mollic gley soils of Low (Male) Polissya. Polish Journal of Soil Science 53 (1), 137-149
  35. 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>
  36. Prost, G. L. (2025). Remote sensing for geoscientists: image analysis and integration. CRC Press.
  37. SOTER (baza danykh pro grunty i relief) [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu> (data zvernennia 03.02.2026).
  38. World reference base for soil resources. - Rome: IUSS, ISRIC, FAO, 2014. 133 p.
  39. Wulf, H., Mulder, T., Schaepman, M. E., Keller, A., Jörg, P. C., & Schaepman, M. E. (2015). Remote sensing of soils. Remote Sensing Laboratories, University of Zurich: Zürich, Germany.
  40. Yuzugullu, O., Lorenz, F., Fröhlich, P., & Liebisch, F. (2020). Understanding fields by remote sensing: Soil zoning and property mapping. Remote Sensing, 12(7), 1116.
  41. Zádorová, T., Skála, J., Žižala, D., Vaněk, A., & Penížek, V. (2021). Harmonization of a large-scale national soil database with the World Reference Base for Soil Resources 2014. Geoderma, 384, 114819.

Надійшла до редакції 22.02.2026 р.

Прийнята до друку 20.03.2026 р.

Опублікована 02.04.2026 р.

