

ЕФЕКТИВНІСТЬ АГРОХІМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ҐРУНТІВ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ

Т.А. Романова¹, М.С. Пономарьова²

¹кандидат сільськогосподарських наук

²кандидат економічних наук

Державний біотехнологічний університет

Міністерства освіти і науки України

вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002, Україна

e-mail: ¹at_romanova@ukr.net, ²univerms@ukr.net

ORCID: ¹0000-0001-5179-8241, ²0000-0001-8463-821X

Надійшла 03.12.2025. Рецензована 09.12.2025. Прийнята до друку 17.02.2026

Мета. Оцінити ефективність агрохімічного моніторингу ґрунтів як інструменту оптимізації системи удобрення в умовах України, визначити економічну доцільність упровадження технологій точного землеробства та окреслити основні бар'єри для їх застосування. **Методи.** Агрохімічний моніторинг ґрунтів передбачає поєднання класичних методів відбору проб і сучасних сенсорних технологій. У дослідженні використано 3 основних методи: мережевий, зонний та випадковий із відбором ядер із глибини 30 см. Лабораторний аналіз полягав у визначенні рН (потенціометрично), вмісту гумусу (метод Тюріна), доступного фосфору й калію (метод Чирікова) та використання спектроскопічних методів (Vis-NIR, NIR, MIR) і ICP-OES для мікроелементів. Польові сенсорні технології містили діелектричні датчики вологості (TDR-зонди), механічні сенсори ущільнення ґрунту та портативні аналізатори поживних речовин. Дані інтегрували з дронними GPS-знімками, обробляли за допомогою геоінформаційних систем та алгоритмів машинного навчання для формування агрохімічних карт і моделей просторової мінливості. **Результати.** Встановлено, що агрохімічний моніторинг забезпечує систематичне спостереження за станом ґрунтів, дає змогу оцінювати рівень поживних речовин, ризику деградації й ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення щодо удобрення. Використання технологій точного землеробства (змінна норма внесення добрив, VRT) сприяє зниженню норм азоту на 14 кг/га, підвищенню ефективності використання добрив на 7–14% та економії витрат на добрива до 2000 грн/га без зниження врожайності. Інтеграція лабораторних і сенсорних даних допомагає прогнозувати потреби рослин у поживних речовинах і мінімізувати екологічні втрати. **Висновки.** Встановлено, що агрохімічний моніторинг ґрунтів є стратегічним інструментом оптимізації системи удобрення та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.

Його впровадження забезпечує економічну ефективність, зменшення витрат на добрива та скорочення негативного впливу на довкілля. Подальший розвиток цифрових систем моніторингу та інтеграція даних у реальному часі є ключовими умовами підвищення сталості та ефективності сучасного українського землеробства.

Ключові слова: географічні інформаційні системи, діагностика родючості, економічна доцільність, технологія змінної норми внесення, точне землеробство.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202602-08>

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективності агрохімічного моніторингу ґрунтів та оптимізації системи удобрення є предметом активних наукових досліджень. Наприклад, автори [1] встановили, що тривале зрошення мінералізованою водою призводить до деградаційних процесів вторинного засолення темно-каштанового ґрунту, водночас система удобрення істотно не впливає на досліджувані параметри. У роботі [2] проаналізовано сучасні мобільні системи моніторингу ґрунтових характеристик і відзначено перспективність електромагнітних та оптичних датчиків для поліпшення якості створених ґрунтових карт. Автори [3] за впровадження технології *no-till* упродовж 13 років зафіксували підвищення вмісту гумусу (на 1,4%) та рухомого фосфору, що підтверджує ефективність систематичного моніторингу. Дослідники [4] обґрунтували концепцію системи земельного моніторингу в Україні, наголосивши на необхідності інтегрованого підходу. Групою вчених [5] було розроблено IoT-комплекс моніторингу вологості ґрунтів із безперервним передаванням даних у режимі реального часу. Авторами [6] встановлено, що за тривалого застосування мінеральних добрив (протягом 11 років) підвищується кислотність чорнозему опідзоленого. Дослідженнями 1981–2021 рр. доведено, що з використанням органо-мінеральної системи удобрення вміст гумусу збільшився на 0,26–0,28%.

Однак, попри значний науковий доробок, питання економічної ефективності впровадження технологій точного землеробства на підприємствах України різних форм господарювання потребують подальшого дослідження.

Сучасні дослідження свідчать про перехід від традиційних методів оцінювання родючості ґрунтів до цифрових систем моніторингу, що забезпечують точність, оперативність та економічну ефективність [17–24]. Водночас залишаються нерозв'язаними питання економічної доцільності та технічної доступності таких систем для малих і середніх господарств.

Мета досліджень — оцінити ефективність агрохімічного моніторингу ґрунтів як інструменту оптимізації системи удобрення, охарактеризувати сучасні методи його проведення та з'ясувати економічні й екологічні переваги його впровадження в умовах України.

Матеріали та методи досліджень. Агрохімічний моніторинг ґрунтів базується на поєднанні класичних методів відбору проб і сучасних сенсорних технологій. У дослідженнях використано 3 основних методи відбору: мережевий (поділ поля на рівномірні ділянки), зонний (відбір за природною мінливістю властивостей ґрунту), випадковий (репрезентативний відбір точок).

Стандартна процедура передбачає використання ґрунтового зонда для вилучення кернів із глибини 30 см, площа кожного з об'єднаних зразків — не

більше 10 га. Важливим чинником є періодичність, оскільки навіть найточніший аналіз втрачає актуальність за нечастого його проведення.

Лабораторні методи аналізу. Використовують класичні методи (потенціометричний аналіз рН, методи Тюріна для визначення вмісту гумусу і Чирікова — для фосфору та калію) та сучасні технології (індуктивно-зв'язану плазмову спектроскопію, спектроскопію Vis-NIR, NIR, MIR), які забезпечують високу точність і швидкість визначення параметрів.

Сенсорні технології. У польових умовах застосовують діелектричні датчики вологості (TDR-зонди), механічні сенсори ущільнення та портативні аналізатори поживних речовин. Дані інтегруються із GPS та зображеннями з дронів, що дає змогу створювати агрохімічні карти й моделі просторової мінливості.

Обробка даних. Зібрані зразки централізують у хмарних платформах, де за допомогою геоінформаційних систем та алгоритмів машинного навчання здійснюють їх аналіз. Це дає змогу формувати карти потреб у добривах, прогнозувати цикли поживних речовин та оптимізувати систему удобрення.

Джерелами можливих похибок є: нерівномірність просторового розподілу поживних речовин, людський фактор під час відбору проб, похибки калібрування лабораторних приладів, технічні збої сенсорів та обмежене покриття мережі, складність інтерпретації великих масивів даних. Урахування цих чинників є необхідною умовою для достовірності результатів та їх практичного використання для оптимізації системи удобрення.

Результати досліджень. Агрохімічний моніторинг ґрунту — це систематичне спостереження за станом ґрунтів із метою оцінювання рівня поживних речовин, ризиків забруднення та ухвалення рішень щодо управління сільськогосподарською діяльністю. Ця практика

передбачає відбір проб на певній глибині, лабораторний аналіз ключових параметрів (рН, вмісту органічних речовин, текстури, забруднювальних речовин). Станом на 2025 р. системи точного землеробства трансформували традиційні підходи, інтегрувавши портативні датчики, аналіз на основі штучного інтелекту та збір даних у реальному часі [8]. Важливо зазначити, що ця технологія набуває особливого значення саме в українських реаліях, де масштаби сільськогосподарських угідь і якість чорноземів формують потенційні можливості.

Моніторинг виявляє деградацію ґрунту на 20% ефективніше за традиційні візуальні огляди, що надзвичайно важливо для діагностики підкислення чорноземів і дефіциту фосфору [9]. Отже, отримані дані — це підґрунтя для оптимізації системи удобрення, де рішення ухвалюють не інтуїтивно, а на основі точних показників.

Основними цілями агрохімічного моніторингу є максимізація ефективності поглинання поживних речовин, мінімізація впливу на довкілля, зниження витрат і підтримка довгострокової родючості ґрунту [10]. Їх досягнення неможливе без якісного відбору проб, оскільки саме методика збору даних визначає достовірність подальших висновків.

Частота відбору проб залежить від типу ґрунту, інтенсивності використання та цілей управління. Стандартні сільськогосподарські ґрунти за стабільних умов зазвичай обстежують кожні 5 років. Частіший моніторинг проводять за зміни практик, підозри на деградацію або впровадження систем точного управління. Станом на 2025 р. понад 45% великих фермерських господарств інтегрують дані аналізів із GPS і зображеннями з дронів для застосування змінних норм, що відображає перехід до безперервного моніторингу. У сучасних програмах використовують

цифрові датчики та відбір проб дронами для створення прогнозних моделей циклів поживних речовин. Зібрані зразки потрапляють до лабораторії, де й формується аналітична основа для управлінських рішень. Зразки проходять детальний лабораторний аналіз.

У табл. 1 наведено основні параметри, методи аналізу та їх призначення в управлінні сільським господарством. Методи аналізу не є сталими — вони еволюціонують разом із розвитком технологій, забезпечуючи дедалі більшу точність і швидкість, зокрема лабораторні методи значною мірою еволюціонували завдяки автоматизації. Індуктивно-зв'язана плазмова спектроскопія (ICP-OES) є стандартом для вимірювання вмісту фосфору, калію та мікроелементів, що забезпечує одночасний аналіз кількох елементів із високою точністю. Спектроскопічні методи (LIBS, Vis-NIR, NIR, MIR) дають змогу швидко оцінювати кілька параметрів без тривалої підготовки. Лабораторна робототехніка виконує завдання з підготовки зразків, а автоматизовані процедури калібрування гарантують відповідність стандартам [12]. Звісно, що лабораторні інновації не існують у вакуумі — вони тісно пов'язані з польовими сенсорними технологіями, які

забезпечують безперервний збір даних безпосередньо в агроценозі.

Збір даних у сучасному моніторингу поєднує традиційне відбирання проб із передовими сенсорними технологіями. Механічні датчики оцінюють ущільнення через вимірювання опору проникнення, а діелектричні датчики вологості (TDR-зонди) безперервно вимірюють уміст вологи та електропровідність на різних глибинах. Агрохімічні обстеження створюють комплексний 3-вимірний профіль стану ґрунту, фіксуючи просторові та часові зміни властивостей.

Після збору даних головне завдання — перетворити їх на корисну інформацію для управління господарством. Для створення агрохімічних карт, карт потреб у добривах і візуалізацій, які показують часові зміни концентрації поживних речовин, використовують автоматизовані системи та ГІС. Хмарні платформи централізують лабораторні результати для перегляду в режимі реального часу та співпраці між заінтересованими сторонами. Оброблена інформація дає змогу оцінювати ключові показники здоров'я ґрунту (нітрати, фосфати, калій, вологість, органічний вуглець) й ухвалювати обґрунтовані рішення щодо внесення добрив, управління зрошенням, заходів захисту



Рис. 1. Схема процесу агрохімічного моніторингу (розробка авторів)

1. Ключові параметри ґрунту та методи лабораторного аналізу

Параметр ґрунту	Метод аналізу	Оптимальні значення для чорноземів	Призначення
pH	Потенціометричний у витяжці KCl	6,0–7,0	Визначення кислотності/лужності ґрунту
Гумус	За Тюрнімом (окиснення)	4–6%	Оцінювання родючості та структури ґрунту
Азот (N-NO ₃)	Іонометричний метод	15–25 мг/кг	Оцінювання доступного азоту для рослин
Фосфор (P ₂ O ₅)	За Чиріковим (для чорноземів)	100–150 мг/кг	Визначення забезпеченості фосфором
Калій (K ₂ O)	За Чиріковим	100–150 мг/кг	Визначення забезпеченості калієм
Мікроелементи (Cu, Fe, Mn, Zn)	Екстракція ДТРА (для карбонатних ґрунтів) або ацетатно-амонійним буфером	Залежно від елемента	Діагностика дефіциту мікроелементів
Гранулометричний склад	Метод Качинського	—	Оцінювання водно-фізичних властивостей
Щільність будови	Метод ріжучого кільця	1,1–1,3 г/см ³	Діагностика ущільнення
Електропровідність (ЕС)	Діелектричні сенсори та TDR-зонди	< 2 дСм/м	Моніторинг вологості та солоності

рослин, одночасно зменшуючи ризики забруднення ґрунтових вод.

Перетворення даних моніторингу на практичні стратегії внесення добрив показало свою надзвичайну ефективність (рис. 2). Дані комплексного аналізу свідчать про те, що технології точного землеробства значною мірою підвищують ефективність використання поживних речовин і врожайність.

Серед технологій точного землеробства технологія змінної норми внесення добрив (VRT) є найуспішнішим практичним застосуванням оптимізації виробництва на основі моніторингу. Польові дослідження показали, що із внесенням добрив за технологією VRT можна заощадити 14 кг/га азоту й зменшити їх витрати на 4% порівняно з показником за рівномірного внесення. У 2021 р. дослідженнями було підтверджено, що у фермерських господарствах, які постійно використовують технології

точного землеробства, ефективність внесених добрив на 7% підвищилася, а за широкого впровадження цих систем на основі моніторингу вона може збільшитися на 14% [13]. Перспективним напрямом стає моніторинг у реальному часі, що відкриває можливості для оперативного управління живленням культур.

Системи моніторингу ґрунту в режимі реального часу з використанням датчиків і дронів дають змогу фермерам безперервно збирати дані про стан ґрунту, що полегшує ухвалення обґрунтованих рішень щодо норм і термінів внесення добрив, зменшуючи відходи та мінімізуючи витрати через надмірне внесення. Ці системи допомагають оптимізувати внесення поживних речовин у конкретні зони поля на основі просторової мінливості родючості з огляду на те, що ділянки одного поля часто мають кардинально різні потреби. Застосовуючи

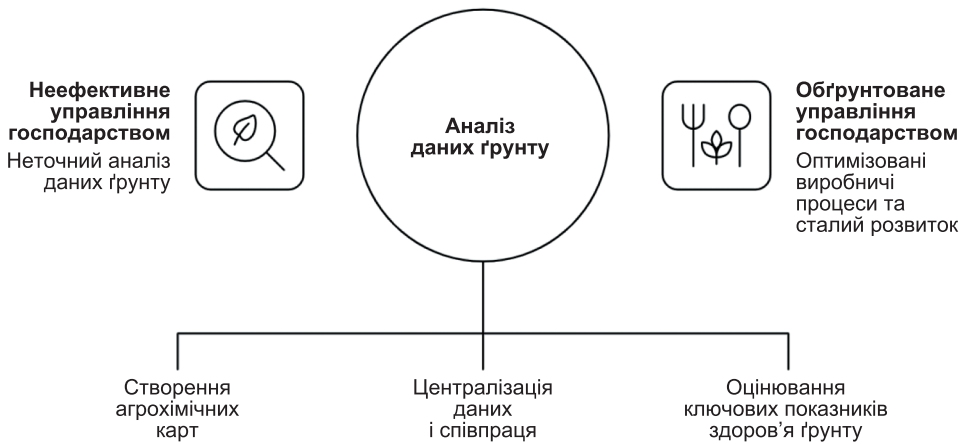


Рис. 2. Перетворення даних ґрунту на корисну інформацію (розробка авторів)

добрива, фермери можуть запобігти екологічним та економічним втратам, водночас забезпечуючи потреби культур у поживних речовинах.

Хоча конкретні кількісні дані щодо запобігання надмірному застосуванню азоту варіюють, дослідження підтверджують, що інструменти точного землеробства (датчики ґрунту, технології на основі GPS) підвищують ефективність використання азоту завдяки їх точному застосуванню в просторі й часі для задоволення потреб рослин. Інтеграція традиційних агрономічних методів із технологіями точного землеробства сприяє значному підвищенню ефективності використання азоту.

Для узагальнення емпіричних даних у табл. 2 наведено кількісні показники впливу та економічні вигоди, задокументовані в останніх польових дослідженнях. У такий спосіб ми отримуємо не лише окремі приклади успішного застосування зазначених технологій, а й економічний та агрономічний ефекти.

Економічна доцільність застосування систем удобрення, сформованих на основі агрохімічного моніторингу, потребує оцінювання з використанням методу часткового бюджетування, що передбачає порівняльний аналіз додаткових витрат та очікуваних економічних вигод

порівняно з традиційними технологіями стосовно удобрення. Технології на основі моніторингу (роздільне внесення азоту, точне внесення добрив) зазвичай передбачають вищі витрати на внесення добрив — від 300–500 до 700–1000 грн/га для умов України, але дають компенсаційні вигоди завдяки зменшенню витрат на самі добрива за досягнення оптимальних економічних норм. Економічна доцільність їх застосування залежить від конкретних характеристик фермерського господарства (родючості ґрунту, рішення щодо посівів, наявних методів управління) з урахуванням безпосередніх витрат на впровадження технологій на основі агрохімічного моніторингу й потенційних змін урожайності [14]. Водночас не можна ігнорувати екологічний вимір, оскільки системи удобрення на основі моніторингу мають стратегічне значення для сталого розвитку аграрного виробництва.

Системи удобрення на основі моніторингу забезпечують істотні екологічні переваги, що сприяє довгостроковій стійкості та дотриманню нормативних вимог. За їх впровадження поліпшується цикл руху поживних речовин і зменшуються їх втрати через випаровування, вимивання, стікання та денітрифікацію. Дослідження інтегрованих сільськогосподарських систем показали, що із

застосуванням вдосконалених стратегій управління поживними речовинами може підвищитися загальна прибутковість завдяки зниженню витрат на вхідні ресурси зі збереженням продуктивності. Хоча деякі наукові розробки на основі моніторингу можуть знизити короткострокову прибутковість порівняно з традиційними методами, вони є цінними довгостроковими інвестиціями, якщо враховувати екологічні переваги та потенціал сталого розвитку. Однак впровадження цих систем має економічні, технічні, культурні та нормативні бар'єри.

Попри задокументовані переваги та доцільність технологій, через значні структурні та практичні перешкоди темпи впровадження зазначених систем є повільними. Економічні бар'єри найбільше гальмують їх широке впровадження в малих і середніх господарствах. Високі початкові інвестиційні витрати на впровадження цих технологій (200 000–1450 000 грн для господарства площею 100 га) разом із поточними витратами на технічне обслуговування, калібрування та оновлення програмного забезпечення залишаються надто дорогими для багатьох фермерських господарств. Для дрібних господарств площею менше 50 га термін їх окупності часто перевищує 5 років. Майже 70% фермерів не застосовують технологічно вдосконалені методи, що свідчить про їх фінансові

обмеження. За очевидних агрономічних й екологічних переваг економічна складова залишається ключовим стримувальним чинником [15]. Навіть коли економічні бар'єри можна долати за допомогою субсидій або угод про спільні закупівлі, технічні передумови істотно впливають на практичну корисність систем моніторингу. Недоліки інфраструктури в сільських районах України (обмежене покриття стільникового зв'язку та LPWAN) змушують фермерські господарства затримувати періодичне завантаження даних замість ухвалення рішень у режимі реального часу. Відсутність уніфікованих стандартів для сільськогосподарських пристроїв IoT перешкоджає взаємодії різних виробників. Фермери часто не мають технічних знань для експлуатації обладнання та оцінювання великих обсягів даних про ґрунт. Це означає, що навіть за наявності фінансової підтримки технічна складність і відсутність інфраструктури залишаються основними стримувальними чинниками.

Фундаментальні проблеми в інтерпретації даних створюють значні перешкоди для перетворення результатів моніторингу на практичні рішення щодо внесення добрив. Традиційні методи відбору проб дають змогу отримати лише обмежену кількість точкових даних, які не повною мірою відображають просторову мінливість. Дані про ґрунт містять різні систематичні та випадкові помилки,

2. Кількісні показники впливу та економічні вигоди технологій точного моніторингу

Технологія/підхід	Кількісний вплив	Економічна вигода
Технологія диференційованого внесення (VRT)	На 14% зменшення норми внесення азоту	Збереження або підвищення врожайності
Технології точного землеробства	На 7% підвищення ефективності використання добрив	Масштабування впровадження системи внесення добрив супроводжується додатковим підвищенням інтегральних показників на 14%
Моніторинг ґрунту в реальному часі	Зменшення витрат мінеральних добрив, підвищення коефіцієнта використання поживних речовин	Мінімізація витрат завдяки оптимізації часу та норм внесення добрив

що потребує ретельного пояснення. З поширенням сучасних датчиків генеруються великі обсяги даних із високою просторовою та часовою частотою. Коли дані успішно зібрані, їх інтерпретація стає критичним бар'єром, що визначає ефективність системи [16].

Навіть коли дані якісні, залишається питання щодо їх практичного застосування, а це потребує додаткових аналітичних кроків і врахування нормативних бар'єрів. Часовий лаг між збиранням зразків та отриманням результатів лабораторних досліджень (часто кілька тижнів) означає, що до впровадження рекомендацій стосовно внесення добрив уже можуть бути втрачені врожай.

Карти врожайності та дані про ґрунт самі по собі не можна використати для чітких рекомендацій стосовно управління агрохімічним забезпеченням, якщо не визначено основних джерел варіацій і їх зв'язку з фізичними та хімічними властивостями ґрунту, а це потребує додаткових аналітичних кроків. Культурні та нормативно-правові бар'єри, зокрема вимоги щодо конфіденційності даних і регулювання експлуатації безпілотних літальних апаратів, додатково стримують упровадження інноваційних технологій та обмежують практичне застосування результатів моніторингу в реальних виробничих умовах.

Висновки

Охарактеризовано сучасні сенсорні технології та їх інтеграцію з геоінформаційними системами, які дають змогу створювати агрохімічні карти та моделі просторової мінливості. З'ясовано кількісні ефекти застосування технологій точного землеробства, зокрема зниження внесення азоту та економію витрат на добрива зі збереженням урожайності. Показано економічні та екологічні переваги систем удобрення на основі моніторингу, що сприяє

довгостроковій стійкості аграрного виробництва. Основними бар'єрами їх упровадження визнано високі інвестиційні витрати, технічні обмеження та недостатню інфраструктуру в сільських регіонах. Доведено, що агрохімічний моніторинг ґрунтів є стратегічним інструментом оптимізації системи удобрення, підвищення продуктивності та зниження екологічного навантаження в умовах сучасного землеробства України.

Romanova T.¹, Ponomariova M.²

The State Biotechnological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, 44 Alchevskykh Str., Kharkiv, 61002, Ukraine; e-mail: ¹at_romanova@ukr.net, ²univerms@ukr.net; ORCID: ¹0000-0001-5179-8241, ²0000-0001-8463-821X

Efficiency of agrochemical monitoring of soils as a tool for optimizing the fertilizer system

Goal. To assess the effectiveness of agrochemical monitoring of soils as a tool for optimizing the fertilizer system in Ukraine, to determine the economic feasibility of introducing precision farming technologies, and to outline the main barriers to their application.

Methods. Agrochemical monitoring of soils involves a combination of classical sampling methods and modern sensor technologies. The study used 3 main methods: network, zone, and random, with the selection of cores from a depth of 30 cm. Laboratory analysis consisted of determining pH (potentiometrically), humus content (Tiurin method), available phosphorus and potassium (Chyrikov method), and using spectroscopic methods (Vis-NIR, NIR, MIR) and ICP-OES for microelements. Field sensor technologies included dielectric moisture sensors (TDR-probes), mechanical soil compaction sensors, and portable nutrient analyzers. The data was integrated with drone GPS-images, processed

using geographic information systems and machine learning algorithms to form agrochemical maps and spatial variability models. **Results.** It was determined that agrochemical monitoring provided systematic monitoring of soil condition, allowed for assessing the level of nutrients, risks of degradation, and made informed management decisions on fertilization. The use of precision farming technologies (variable fertilizer application rate, VRT) helped to reduce nitrogen standards by 14 kg/ha, increase fertilizer use efficiency by 7–14%, and save fertilizer costs up to 2000 UAH/ha without reducing yield. The integration of laboratory and sensory data helped to predict plant nutrient needs and

minimize environmental losses. Conclusions. It was determined that agrochemical monitoring of soils was a strategic tool for optimizing the fertilizer system and increasing the productivity of crops. Its implementation ensured economic efficiency, reducing fertilizer costs and the negative impact on the environment. Further development of digital monitoring systems and real-time data integration is a key condition for increasing the sustainability and efficiency of modern Ukrainian agriculture.

Key words: geographical information systems, fertility diagnostics, economic feasibility, variable rate application technology, precision farming.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202602-08>

Бібліографія

1. Біднина І.О., Вожегова Р.А., Лиховид П.В. Агромеліоративна оцінка стану темно-каштанового ґрунту в 7-пільній сівозміні за різних систем удобрення культур при зрошенні мінералізованою водою. *Аграрні інновації*. 2022. № 15. С. 5–14. doi: 10.32848/agrar.innov.2022.15.1

2. Соколік С.П. Аналіз розвитку сучасних мобільних систем для моніторингу ґрунтових характеристик. *Вісник Сумського аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2024. Вип. 2. № 56. С. 86–89. doi: 10.32782/msnau.2024.2.12

3. Войтовик М.В., Баранник А.В., Гарбар В.В., Лісовський А.С. Практичний моніторинг родючості ґрунту з впровадження ґрунтозберігаючих систем землеробства (на прикладі технології no-till). *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2024. № 45. С. 7–15. doi: 10.37406/2706-9052-2024-4.1

4. Третяк А.М., Третяк В.М., Прядка Т.М. та ін. Земельний моніторинг в Україні: поняття та методологія формування. *Агросвіт*. 2022. № 1. С. 3–12. doi: 10.32702/2306-6792.2022.1.3

5. Жуковський В.В., Шатний С.В., Жуковська Н.А., Шатна А.В. Вимірювально-аналітичні засоби IoT-моніторингу вологості ґрунтів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2025. Т. 35. № 4. С. 115–122. doi: 10.36930/40350413

6. Господаренко Г.М., Любич В.В., Мартинюк А.Т. Агрохімічні властивості ґрунту

за тривалого застосування мінеральних добрив. *Аграрні інновації*. 2023. № 19. С. 34–38. doi: 10.32848/agrar.innov.2023.19.5

7. Надточій П.П., Ратошнюк В.І., Ратошнюк Т.М. Вплив добрив на агроекологічний стан дерново-підзолистого ґрунту і продуктивність культур сівозміни. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2023. № 38. С. 84–92. doi: 10.37406/2706-9052-2023-1.12

8. Моніторинг земель: призначення та завдання. Міністерство аграрної політики та продовольства України. https://legalaid.wiki/index.php/Моніторинг_земель.

9. Pozniak S. Chernozeams of Ukraine: past, present and future perspectives. *Soil Science Annual*. 2019. 70(3). P. 193–197. doi: 10.2478/ssa-2019-0017

10. What Are the Benefits of Real-Time Soil Data From Soil Parameter Detectors? Rika Sensor. URL: <https://www.rikasensor.com/a-what-are-the-benefits-of-real-time-soil-data-from-soil-parameter-detectors.html>. [18.11.2025]

11. *A Field Guide to Soil Sampling*. Michigan State University Extension. East Lansing, MI, 2022. 16 с. (Soil Health Series). <https://www.canr.msu.edu/resources/a-field-guide-to-soil-sampling>

12. Cai B., Shi F., Geremew B.A. et al. Precision agriculture techniques for optimizing chemical fertilizer use and environmental sustainability: a systematic review. *Frontiers in Agronomy*. 2025. 7. doi: 10.3389/fagro.2025.1665444

13. Nasiro K., Mohammednur T. Precision Nutrient Management Amid Climate Change Challenges: A Review. *Science Frontiers*. 2024. 6(3). P. 110–122. doi: 10.11648/j.sf.20240503.12
14. *The Future of Farming: Top AgTech Trends and Innovations to Watch in 2025*. AgTech Breakthrough. URL: <https://agtech-breakthrough.com/agtech-2025-key-trends-innovations-and-challenges-shaping-the-future> [27.09.2025].
15. *Understanding Soil Data: A Beginner's Guide to Soil Mapping Technologies / EarthOptics*. URL: <https://earthoptics.com/news-insights/understanding-soil-data-a-beginners-guide-to-soil-mapping-technologies>. [01.04.2024].
16. Even R., Machmuller M., Lavallee J. et al. Francesca Cotrufo Large errors in soil carbon measurements attributed to inconsistent sample processing. *SOIL*. 2025. 11(1). P. 17–34. doi: 10.5194/soil-11-17-2025
17. FAO. Guidelines for Soil Description. 4th ed. Rome: FAO, 2019. 110 p.
18. Malone B.P., Styc Q., Minasny B., McBratney A.B. Digital soil mapping of soil carbon at the farm scale: A spatial downscaling approach in consideration of measured and uncertain data. *Geoderma*. 2017. V. 290. P. 1–10. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.12.008
19. Dobos E., Micheli E., Baumgardner M.F. The role of field soil sampling in supporting remote sensing-based soil assessment. *Soil Science Society of America Journal*. 2016. 80(2). P. 361–372. doi: 10.2136/sssaj2015.08.030
20. Hengl, T., de Jesus J.M., MacMillan R.A. SoilGrids1km — global soil information based on automated mapping. *PLoS ONE*. 2014. 9(8):e105992. doi: 10.1371/journal.pone.0105992
21. McBratney A.B., Santos M.M., Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma*. 2003. 117(1–2). P. 3–52. doi: 10.1016/S0016-7061(03)002
22. Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C. Field Book for Describing and Sampling Soils. Lincoln, NE: National Soil Survey Center Natural Resources Conservation Service, 2012. 300 p.
23. Grunwald S. Soil quality and health assessment in digital soil mapping. *Geoderma*. 2006. 133(3–4). P. 229–242. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.07.012
24. Malczewski J., Rinner C. Multicriteria Decision Analysis in GIS. New York: Springer, 2015. 410 p. doi: 10.1017/978-3-540-74757-4