

Віктор Васильович Ворох¹, Ольга Василівна Глоба²¹аспірант кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: fainkucha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>²магістр наук, кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: olgagloba73@knu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4923-3374>**МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ В ЗЕМЛЕРОБСТВІ**

Цифровий моніторинг є ключовим інструментом у розвитку точного землеробства, забезпечуючи оперативну оцінку стану агросистем і можливість просторово обґрунтованого управління технологічними процесами. В умовах підвищеного навантаження на ресурси, зміни клімату та варіативності ґрунтових умов виникає потреба в комплексному аналізі параметрів, що впливають на врожайність сільськогосподарських культур. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження інноваційних цифрових технологій у землеробстві, здатних підвищити ефективність агровиробництва, адаптивності до умов середовища та зменшити витрати ресурсів. До основних застосованих підходів належать: агрохімічний аналіз (вміст азоту, фосфору, калію, кислотність), просторове зондування електропровідності ґрунтів для виявлення структурних відмінностей, а також дистанційне зондування за допомогою супутникових даних Sentinel-2 для розрахунку вегетаційного індексу NDVI. Додатково використано телеметричні дані польової техніки, які дозволили оцінити ефективність виконання технологічних операцій, зокрема картографувати витрати пального. Отримані результати подано у вигляді тематичних карт та таблиць, що ілюструють просторову варіативність ключових показників. Дослідження показало значну різноманітність ґрунтових характеристик у межах одного поля, що підтверджується як агрохімічними результатами, так і показниками електропровідності. Просторові відмінності у значеннях NDVI свідчать про неоднорідність розвитку посівів, зумовлену комбінацією ґрунтових, кліматичних та технологічних факторів. Аналіз телеметричних даних виявив тенденції до впорядкування маршрутів і раціоналізації використання техніки, що опосередковано впливає на енергоефективність польових робіт. Інтеграція цифрових методів моніторингу — агрохімічного, електрофізичного, телеметричного й дистанційного — забезпечує багатовимірне розуміння стану агросистем. Такий підхід дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо диференційованого управління, знижує ризики перевитрат ресурсів і створює основу для сталого розвитку агровиробництва.

Ключові слова: цифровий моніторинг; точне землеробство (ПЗ); геоінформаційні системи (ГІС); телеметрія; дистанційне зондування Землі (ДЗЗ); вегетаційні індекси; NDVI (нормалізований диференціальний вегетаційний індекс); агрохімічний аналіз; картографування; ресурсоефективність; просторовий аналіз; агротехнології.

Рис.: 9. Бібл.: 31.

Актуальність теми дослідження. Зростаюча гетерогенність агроландшафтів, зумовлена природними і техногенними факторами, ускладнює ухвалення агротехнологічних рішень за традиційними схемами. Цифровий моніторинг дозволяє адаптувати землеробські практики до змінних умов, зменшуючи витрати та екологічне навантаження. Тому актуальним є вивчення ефективності цифрових рішень у контексті просторової мінливості сільськогосподарських територій та реальних виробничих умов.

Постановка проблеми. У сучасному аграрному виробництві відбувається стрімкий перехід до інноваційних технологій управління природноресурсним потенціалом, спрямованих на підвищення стійкості, ефективності та екологічності агросистем. В умовах підвищеного кліматичного навантаження та ресурсних обмежень аграрний сектор вимагає застосування рішень, що базуються на точних, просторово обґрунтованих даних. У цьому контексті особливої уваги набуває цифровий моніторинг — як комплексний підхід до збору, обробки й аналізу інформації про стан ґрунтів, посівів та довкілля за допомогою ДЗЗ, ГІС, GPS, телеметрії та сенсорних систем.

Новизна та практична цінність дослідження. Робота відрізняється комплексним застосуванням агрохімічних, проксимальних, дистанційних та телеметричних методів моніторингу для оцінки просторової неоднорідності агроєкосистем на рівні окремих полів у господарствах Чернігівської та Тернопільської областей. Особливістю є поєднання власних польових вимірювань, супутникових знімків Sentinel-2 та телеметричних даних сільськогосподарської техніки з інтеграцією результатів у геоінформаційне середовище для створення тематичних карт і практичних рекомендацій. Отримані результати можуть бути використані для диференційованого внесення добрив, оптимізації маршрутів техніки та своєчасного виявлення стресових зон посівів.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж останніх років спостерігається активне зростання кількості наукових праць, присвячених цифровому землеробству, що підтверджується даними з баз Scopus та Web of Science. Зокрема, описують інтеграцію супутникових спостережень з алгоритмами аналізу для підвищення точності прийняття рішень [23], та акцентують увагу на ролі вегетаційних індексів (NDVI, NDRE, SAVI) у діагностиці стану посівів [14; 27]. Вітчизняні науковці зазначають, що впровадження цифрових технологій у фермерських господарствах дозволяє підвищити адаптивність агротехнологій [29], але водночас треба звернути увагу та підкреслити критичну роль якості вхідних даних для моделей машинного навчання в агросфері [16]. Також, доволі є актуальним питання економічної ефективності цифрових систем для малих господарств [30].

Попри позитивні результати досліджень, залишається низка нерозв'язаних проблем: обмежена інтеграція гетерогенних джерел даних у єдині аналітичні платформи; відсутність узагальнених підходів до оцінки точності моделей у різних ґрунтово-кліматичних умовах; недослідженість аспектів масштабованості цифрових рішень у межах України. Відтак виникає потреба у практичній апробації цифрових методів моніторингу в умовах реального виробництва з урахуванням просторової мінливості агроєкосистем.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є агроландшафти як просторово неоднорідні системи. Предметом — цифрові технології моніторингу стану ґрунтів, рослинності та агротехнічних параметрів, включаючи аналіз вегетаційних індексів, агрохімічні дослідження та просторову обробку телеметричних даних.

Мета статті полягає у системному аналізі та практичній оцінці ефективності цифрових методів моніторингу в агровиробництві, з подальшою візуалізацією результатів та формуванням аналітичної основи для прийняття управлінських рішень у точному землеробстві.

Виклад основного матеріалу. Цифровий моніторинг в землеробстві передбачає комплексне використання сучасних технологій для збору, обробки та аналізу даних про стан агроєкосистем. Основними об'єктами моніторингу виступають ґрунт, посіви, погодні умови та сільськогосподарська техніка. Методи, що застосовуються для цього, поєднують класичні підходи агрохімічної діагностики з інноваційними цифровими рішеннями – від автоматизованих сенсорних систем до моделей машинного навчання [23; 26].

Початковим етапом є агрохімічне обстеження ґрунтів, яке передбачає планування точок відбору, їхню геопросторову прив'язку та лабораторний аналіз. У сучасному землеробстві переважає сітковий підхід (grid sampling), де поле ділиться на осередки, а проби беруться в центрі кожної клітини див. (рис. 1). Альтернативою виступає коміркова стратегія див. (рис. 2), за якої здійснюється множинний забір зразків у межах клітинки для більшої точності [31].

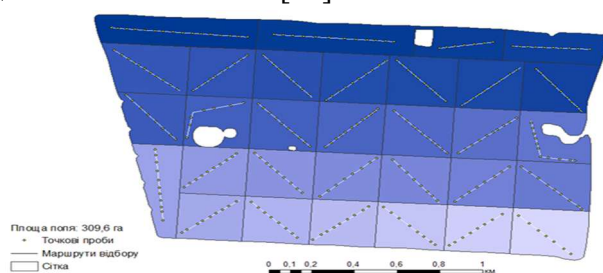


Рис. 1. Коміркова схема відбору проб ґрунту з діагональним ходом [31]

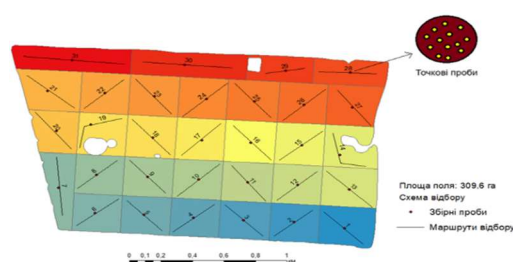


Рис. 2. Точкова схема відбору проб ґрунту [31]

Польовий відбір здійснюється автоматизованими пробовідбірниками, оснащеними GPS та контролерами. Це дозволяє значно підвищити швидкість і точність польових робіт. Відбір ґрунту здійснюється на глибину 0-25 см (для орних земель) і до 60 см при аналізі нітратного азоту [28]. Стандарти відбору регламентуються ДСТУ 4287:2004 та методиками, адаптованими до агроландшафтних умов [17].

Надалі здійснюється просторове моделювання параметрів ґрунту методами IDW-інтерполяції (Inverse Distance Weighting), що забезпечує прогноз значень між точками вимірювання з високою точністю [7].

Поєднання результатів агрохімічних досліджень з ГІС-аналітикою та дистанційним зондуванням забезпечує науково обґрунтоване управління ґрунтовими ресурсами на довгострокову перспективу, див (рис.3).

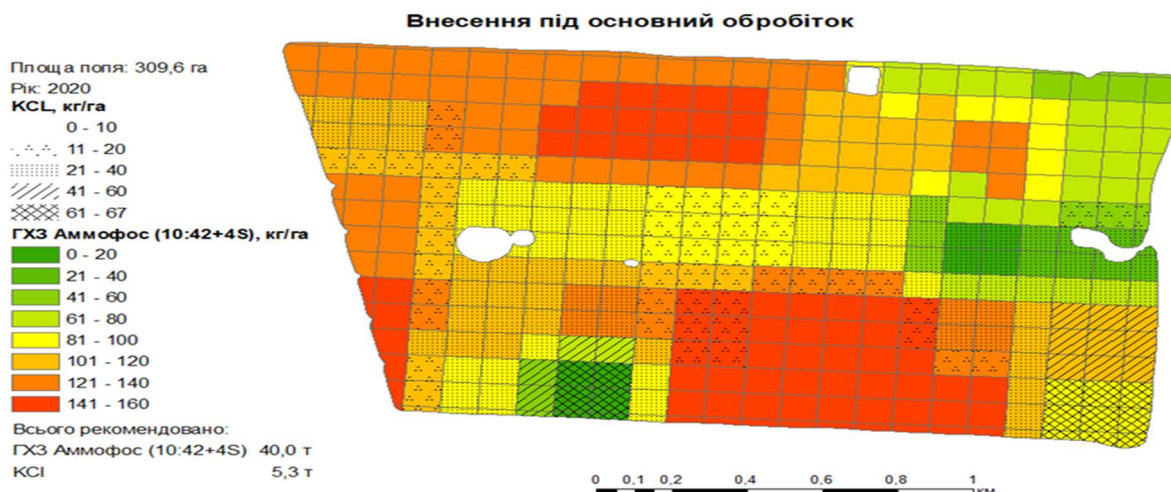


Рис.3. Карта-завдання на внесення добрив для сільськогосподарської техніки, створена на основі ґрунтових показників [31].

Проксимальне зондування ґрунтів (proximal soil sensing) являє собою використання польових сенсорів/датчиків у безпосередній близькості (на відстані менше 2 м від поверхні) або контакті з ґрунтом для швидкого зчитування його властивостей. Такі сенсори можуть бути стаціонарні (встановлені на місці для постійних вимірів) або рухомі (закріплені на транспортному засобі чи платформі для рухомої «on-the-go» зйомки) [8].

Інтеграція сенсорних даних із супутниковою навігацією відкриває принципово нові можливості для просторового картографування ґрунтових властивостей. Використання GNSS-пристроїв, особливо з реальним часом корекції (RTK-GPS) та точністю позиціонування на рівні 1-2 см, дає змогу прив'язувати кожне вимірювання до точних координат і висотних відміток [1]. Установивши на один рухомий агрегат кілька типів сенсорів, можна отримати синхронний набір даних за різними властивостями ґрунту, що дозволяє всебічно оцінювати його стан і точково коригувати агротехнічні операції.

Хоча деякі сучасні датчики безпосередньо вимірюють агрономічно значущі параметри (наприклад, кислотність ґрунту), більшість приладів реєструють проміжні фізико-хімічні характеристики, які потрібно калібрувати лабораторними вимірюваннями [20].

Сучасні проксимальні системи зондування дають змогу оперативно та без лабораторних досліджень оцінювати головні хімічні характеристики ґрунту. Для визначення запасів доступних рослинам макро- (N, P, K, S) та мікроелементів використовуються спектроскопічні методи у видимому, ультрафіолетовому та інфрачервоних (ближньому, середньому) діапазонах, які аналізують відбитий ґрунтом світловий спектр, а також іонно-селективні датчики (ISFET) і електрофоретичні підходи [3]. Кисотно-лужний баланс контролюють виключно іонно-селективними польовими транзисторами, що забезпечують безперервне картографування змін кислотності. Вміст органічної речовини легко оцінити за допомогою тих самих ІЧ-спектроскопічних систем, адаптова-

них для кількісного аналізу вуглецю та гумінових компонентів [22,25]. Проблеми високого вмісту натрію та засоленості ґрунту виявляються через електромагнітну індукцію та вимірювання електричного опору ґрунту, що дозволяє оперативно картувати відповідні хімічні зони.

Для просторового моніторингу ключових фізичних характеристик ґрунту застосовують низку проксимальних сенсорних технологій. Методи електромагнітної індукції та вимірювання електричного опору під час руху агрегату дозволяють оцінити електропровідність ґрунту, що корелює з його вмістом глини, ємністю катіонного обміну та запасом доступної вологи (рис. 6) [11].

Проксимальне зондування доповнює класичні підходи за рахунок використання сенсорів у безпосередній близькості до поверхні ґрунту. Серед найпоширеніших – електромагнітні сенсори (для оцінки електропровідності), спектроскопічні системи (оцінка органічної речовини, рН, вологи), іон-селективні сенсори (рН, натрій) та теплові датчики [22].

Спектроскопія у видимому, ближньому та середньому інфрачервоних діапазонах дає змогу судити про текстуру, вміст органічної речовини та вологість верхніх шарів ґрунту, а термальна інфрачервона зйомка фіксує температурні аномалії, що відображають нерівномірність вологоутримання. Радіолокаційні системи (радарне зондування) та вимірювання тягового опору ґрунтообробних знарядь (tillage draft) використовуються для виявлення субповерхневих перепон – ущільнених шарів або кам'яних включень, що обмежують розвиток кореневої системи. Для оперативного контролю вологи протягом вегетаційного періоду широко впроваджують ґрунтові вологоміри різних типів, а також теплове інфрачервоне дистанційне зондування, що дозволяє в реальному часі стежити за динамікою вологи. Виявлення зон перезволоження й підтоплення здійснюється поєднанням цифрових моделей висот, локальних вимірювань електропровідності та спостережень рівня ґрунтових вод у мініп'езометрах [10].

Автоматизовані пенетрометри застосовуються для лабораторно-польового вивчення явища твердості ґрунту, яка характеризується індексом опору конуса (cone index) і безпосередньо відображає ступінь ущільнення ґрунтової маси. Всередині приладу тензодатчик (strain gauge) або конусний трансдюсер фіксують зміну сили (опору ґрунту) й передає про це інформацію в реєстратор. Паралельно з вимірюваннями виконується GPS-геоприв'язка, що дозволяє отримати просторову карту розподілу твердості за глибиною до 30-50 см із кроком 1-2 см. Відтворюваність результатів забезпечується стандартизацією конусного кута і швидкості занурення, а електронна система реєстрації гарантує високу точність вимірювань і можливість подальшого статистичного та геостатистичного аналізу [21].

Пристрої проксимального зондування — це фактично «розумні» сенсори (вологоміри, датчики електропровідності, рН-зонди тощо), котрі збирають дані безпосередньо в полі. Щоб зробити ці виміри доступними в реальному часі кожен із таких сенсорів підключають до IoT-мережі. Для передачі показників із поля використовують низькошвидкісні, енергоефективні мережі — LoRaWAN (мережа великої дальності та широкого покриття), NB-IoT (вузькосмуговий IoT-речей) тощо, чиї протоколи дозволяють відправляти кілька десятків байт даних через десятки кілометрів без значного споживання енергії [12]. Дані із сенсорів збирає локальний IoT-координатор, а потім через інтернет надсилає на хмарну платформу чи сервер. Там вони агрегуються, обробляються аналітичними алгоритмами та зберігаються в базі даних.

Завдяки IoT-підключенню агроном чи фермер може у будь-який момент побачити показники вологості, температури, електропровідності ґрунту або рівня рН у кожному «вузлі» мережі – навіть із мобільного додатку чи вебпорталу.

Метеомоніторинг – це комплексна система регулярних спостережень, збору, обробки та аналізу даних про стан основних атмосферних параметрів (температура, вологість повітря, опади, швидкість та напрямок вітру, сонячна радіація, тиск тощо) з використанням мережі наземних метеостанцій, радарів, супутникових платформ й автоматичних датчиків.

Традиційні стаціонарні польові метеостанції розміщені безпосередньо на полі чи поблизу нього та безперервно вимірюють ключові метеопказники (температуру повітря, відносну вологість, кількість опадів, швидкість вітру тощо) в одній локації. Вони забезпечують базові дані про мікроклімат господарства та слугують еталонними точками спостереження. Мобільні метеостанції, що встановлюються на транспортних засобах чи БПЛА, доповнюють стаціонарні пункти, дозволяючи збирати дані з різних частин поля на різних висотах. Головна перевага мобільних станцій – висока просторово-часова деталізація даних: рухома платформа забезпечує щільнішу сітку вимірювань мікроклімату по території господарства. Бездротові сенсорні мережі великої кількості дрібних датчиків (сенсорів), встановлюються у ґрунті та над поверхнею по всій площі поля, де кожен сенсор може вимірювати локальні параметри (температуру ґрунту й повітря, вологість, інтенсивність випаровування тощо) у режимі реального часу. Дані передаються бездротовим шляхом на центральну базову станцію. Для такої телеметрії застосовуються енергоощадні далекодіючі радіомережі. Бездротові сенсорні мережі дозволяють аграріям отримувати дані про мікроклімат із різних точок одночасно в режимі реального часу, досягаючи геопросторового охоплення всієї площі поля (на відміну від точкових стаціонарних вимірювань) [6].

Іншим потужним інструментом є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). Оптичні супутники (Sentinel-2, Landsat-8), радарні платформи (Sentinel-1) та гіперспектральні сенсори (Hyperion) дозволяють здійснювати моніторинг вологості, органічної речовини, засолення, NDVI, NDMI та інших індексів. У табл. 1 узагальнено на основі відкритих наукових джерел та систематизовано під потреби оцінки стану ґрунтів і посівів у межах дослідних полів подано порівняльну характеристику різних типів супутникового зондування [9; 19]. Супутникові ДЗЗ-системи, такі як Landsat, Sentinel-2, MODIS та EOS-SAT 1 є базовими інструментами дистанційного моніторингу ґрунтів [29].

Протягом останніх десятиліть супутникові системи значно вдосконалилися. Найважливіші зміни включають:

- збільшення просторової розрізненості — від 80 м у перших супутниках Landsat до < 1 м у сучасних системах, таких як GeoEye, WorldView;
- підвищення частоти повторного знімання — від 18 днів (Landsat) до майже щоденного оновлення даних (2-3 дні) завдяки мережам супутників, таким як Sentinel-2 або PlanetScope;
- розширення спектрального діапазону: сучасні гіперспектральні сенсори, наприклад Hyperion (NASA), здатні фіксувати понад 200 спектральних діапазонів від 400 до 2500 нм із кроком 10 нм з просторовою розрізненістю 30 метрів.

Оптичні супутники (як-от Sentinel-2, Landsat) дозволяють оцінювати вологість ґрунту опосередковано — через спектральні індекси чи температуру поверхні. Наприклад, Landsat 5/7/8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) працює в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (близько 10-12 мкм) і реєструє яскравісну температуру поверхні Землі, з якої за допомогою корекцій на емісивність та атмосферу обчислюють температуру земної поверхні (LST) [16; 19].

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів супутникового зондування для завдань цифрового моніторингу в точному землеробстві

Параметр	Панхроматичні	Мультиспектральні	Гіперспектральні	Радарні (SAR)
Кількість каналів	1	4-10	100-400	1 (мікрохвильовий)
Тип випромінювання	сонячне (пасивне)	сонячне (пасивне)	сонячне (пасивне)	мікрохвилі (активне)
Чутливість до погоди	висока (непридатні при хмарності > 10%)	висока (залежить від хмарності)	висока	низька (працює за будь-яких умов)
Основні завдання	деталізоване картографування рельєфу; підвищення просторової чіткості за допомогою паншарпенінгу	аналіз біомаси, розрахунок спектральних індексів, моніторинг стан рослин	аналіз неявних змін ґрунтового покриву	моніторинг вологості ґрунту, рельєфу, змін у рослинності
Обмеження	Монохромне зображення	середня точність	дороговартісна обробка, складний аналіз	складна інтерпретація даних

Джерело: власна розробка.

Сучасні технології дистанційного зондування надають аграріям доступ до погодної інформації з супутників, що доповнює наземні вимірювання. Наприклад, глобальні опади сьогодні можна моніторити із використанням супутника NASA GPM (Global Precipitation Measurement) та європейських Sentinel-супутників.

Окрім супутників, важливу роль відіграють чисельні моделі атмосфери та кліматичні реаналізи у прогнозуванні погоди для землеробства. Реаналізи — поєднання модельного прогнозу з усіма доступними спостереженнями (як наземними, так і супутниковими) за тривалий період, що дає погодні дані на регулярній сітці з високою розрізненістю. Приклад — ERA5 від Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), що надає погодні параметри (температура, вологість, вітер, опади тощо) на глобальній сітці 30 км з часовим кроком 1 година. Дані ERA5-Land із підвищеною просторовою розрізненістю (до 9 км) на суходолі успішно застосовуються для оцінки зволоження ґрунтів і водного балансу на полях, що важливо для прийняття рішень щодо зрошення [15]. Вони дозволяють проводити ретроспективний аналіз кліматичних ризиків, моделювати розвиток посівів за різних погодних сценаріїв, а також вдосконалювати короткострокові прогнози погоди для конкретних локацій. На основі реаналізів та оперативних моделей національні гідрометслужби і приватні сервіси формують прогнози погоди на кілька днів вперед з прив'язкою до конкретних полів.

Інтернет речей (IoT) сьогодні проникає в агрометеорологію, об'єднуючи мережі сенсорів, бездротовий зв'язок і хмарні технології для автоматизованого збору та аналізу даних про погоду. Бездротова передача даних у польових умовах реалізується за допомогою різних технологій IoT-зв'язку: для відносно невеликих відстаней (десятки метрів) використовуються протоколи на кшталт Bluetooth або Zigbee; для середніх дистанцій (сотні метрів) — Wi-Fi чи Mesh-мережі; а для великих господарств і віддалених датчиків — LPWAN-мережі.

Сучасні платформи агромоніторингу інтегрують різноманітні дані (числові вимірювання, GPS-координати, часові ряди, навіть візуальні зображення) у єдиному інформаційному середовищі. Застосування алгоритмів обробки дозволяє автоматично виявляти тенденції та аномалії. Наприклад, система може в режимі реального часу проаналізувати телеметрію з десятків датчиків вологості ґрунту і на основі заданих порогів генерувати сповіщення про ризик посухи на певній ділянці поля. Або ж, отримавши дані про різке зниження температури на полі, IoT-платформа негайно повідомить фермера про загрозу

заморозків. Таким чином, IoT-технології роблять метеомоніторинг проактивним: не лише фіксують погодні показники, а й одразу перетворюють їх на сигнали для прийняття агротехнічних рішень.

Високоточна оцінка стану посівів також можлива за допомогою БПЛА, оснащених мульти- та гіперспектральними камерами, а також тепловізорами (рис. 4). Вони забезпечують деталізацію до 10...30 см і дозволяють виявляти фітопатологічні стани ще до появи візуальних симптомів [4]. Для автоматизованого виявлення бур'янів та зон ураження культур використовуються згорткові нейронні мережі (CNN), зокрема моделі типу YOLOv3 [26].

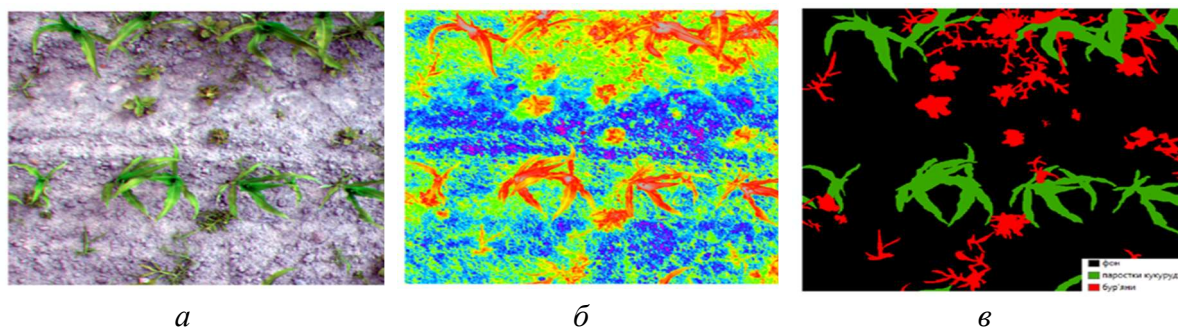


Рис. 4. RGB-знімок (а), удосконалене за допомогою ближнього інфрачервоного і червоного крайового діапазонів зображення (б) та карта семантичної сегментації посівів кукурудзи й бур'янів (в) [26]

Сучасні дослідження у галузі виявлення шкідників здебільшого переходять на глибоке навчання. Згорткові нейронні мережі (CNN) самостійно вчаться виділяти складні ознаки з даних. Для цього теж використовуються БПЛА-знімки. Наприклад, дрони з тепловими та спектральними камерами використовували для моніторингу позначених за допомогою моделі сегментації зображень YOLOv3 клопів-щитників (*T. papillosa*) у садах [5].

Моделі росту сільськогосподарських культур (crop models) симулюють фізіологію рослин на основі вхідних даних про погоду, ґрунт, сорт культури та прийоми обробітку. Моделі APSIM, DSSAT, AquaCrop тощо широко застосовуються для моделювання цукрових буряків, зернових, олійних культур тощо. У дослідженні 2024 року модель AquaCrop була налагоджена на погодних і ґрунтових даних території Польщі, і кінцева середньоквадратична похибка прогнозу врожайності склала всього від 0,21 до 1,65 % від середнього врожаю (для кукурудзи й цукрових буряків) [18].

Супутникові платформи Copernicus (Sentinel-1, -2), Landsat, високочастотні супутники PlanetScope та БПЛА з мульти- і гіперспектральними камерами забезпечують багаторічні серії зображень рослинності. Модель росту посівів DSSAT з навчальними даними у вигляді індексу LAI дозволила в Меріленді (США) отримати розумно точні прогнози врожаю кукурудзи і сої: при цьому нормалізована середньоквадратична похибка становила 1-20 % від середнього врожаю [13]. У низці досліджень гіперспектральні знімки БПЛА від стадії цвітіння до заповнення зернівки дозволили побудувати моделі, де комбінації спектральних індексів і лінійної регресії забезпечують коефіцієнт детермінації понад 0,62-0,78 для врожайності пшениці [2].

Моделі машинного навчання – алгоритми, що навчаються на історичних даних із супутникових знімків та польових вимірів, дозволяють вивчати складні залежності між вхідними ознаками та урожаєм. Серед них: ансамблевий метод Random Forest (RF), Gradient Boosting, метод опорних векторів (SVM) та глибокі нейронні мережі (CNN для просторових патернів і LSTM/RNN для часових рядів).

Цифровий моніторинг техніки реалізується через телематичні системи (JDLink, TELEMATICS, Trimble). За допомогою GNSS-модулів, сенсорів обертів, тиску та витрат пального можна збирати дані про роботу агрегатів у режимі реального часу (рис. 7). До прикладу для побудови карти витрат пального було застосовано комплексний метод, який поєднує агротехнічні розрахунки, геопросторовий аналіз та статистичну класифікацію, що дозволяє визначити фактичне споживання пального з урахуванням пройденої відстані та ширини захвату техніки (вираз 1).

$$\text{FUEL}_{\text{л/га}} = \frac{\text{FUEL}_{\text{(л)}}}{\text{DISTANCE}_{\text{(м)}} \times \text{SWATHWIDTH}_{\text{(м)}}} \times 10000. \quad (1)$$

Такий метод дає можливість визначити затрати пального та прийняти комплекс обґрунтованих рішень для подальшої економії від обробітку ґрунту до збирання врожаю. Наприклад, аналіз від компанії «Farmonaut» продемонстрував, що телематичні жнивarki досягають зниження витрат пального на понад 16 % при інтегрованому використанні даних телеметрії. Інші дослідження підтверджують, що загальна економія ресурсів (паливно-мастильних матеріалів, ЗЗР, добрив) при переході на системи точного землеробства складає від кількох до десятків відсотків залежно від масштабу ферми і ступеня цифровізації [24].

Дослідження авторами проводилося на полі площею 309,6 гектара, що розташоване поблизу села Берізка у Варвинській ТГ Прилуцького району Чернігівської області, на основі даних агрокомпанії «Кернел» та поле площею 117 гектарів, знаходиться в Тернопільській області неподалік села Шипівці Заліщинського району на основі даних агрокомпанії «Агросем».

Ґрунти поля переважно представлені типовими малогумусними чорноземами та деградованими легкосуглинковими чорноземами, що характеризуються високим аграрним потенціалом, але водночас потребують особливої уваги до збереження їх родючості та структури. Час є критичним фактором для отримання надійних значень показників ґрунту. До прикладу, електропровідність ґрунту залежить від вмісту солей у ґрунтовому розчині. Щоб отримати точні вимірювання, необхідно дочекатися, коли концентрація іонів стабілізується після змішування з водою чи іншим розчином.

Систематичний агрохімічний моніторинг ґрунту дає змогу кількісно оцінити просторову й тимчасову мінливість його властивостей (табл. 2). Ці дані лежать в основі диференційованого внесення добрив і захисних заходів, що підвищує ефективність використання ресурсів та зменшує ризики деградації та візуалізуються у вигляді картограм див. (рис. 5, а).

Таблиця 2 – Результати агрохімічного обстеження поля протягом десятиліття

Показник	Метод	Середнє значення [кількість ґрунтових проб]			
		2010	2013	2016	2020
pH (KCl), од.pH	ДСТУ ISO 10390:2019, IDT	6,25 [56]	-	5,84 [31]	5,7 [30]
Органічна речовина, %	ДСТУ 4289:2004	3,96 [11]	3,77 [28]	-	3,7 [30]
Рухомий фосфор (P ₂ O ₅), мг/кг	ДСТУ 4115-2002 (за методом Чирикова)	100,0 [32]	111,0 [59]	146,2 [31]	142,9 [30]
ДСТУ 4115-2002 (за методом Чирикова)	обрані методи випробування («Recommended chemical soil test procedures for the Central North Region. Chapter 7: Potassium and other Basic Cations» by D. Warncke and J.R. Brown)	105,5 [32]	100,5 [59]	106,5 [31]	121,2 [30]

Джерело: дані, надані агрокомпанією «Кернел»

Одним із найпростіших методів отримання картографічних даних для прецизійного землеробства є інтерполяція — метод математичного прогнозування значень у невідомих точках на основі вимірних значень у відомих точках див.(рис.5б). Також широко використовується геостатистика, адже неможливо зробити аналіз кожного квадратного метра поля. Тому інтерполяційні та геостатистичні методи дозволяють оцінювати просторовий розподіл параметрів із меншою кількістю польових вимірювань, тобто при більших розмірах комірки сітки, зберігаючи при цьому високу точність прогнозів. Наразі існують й інші технології, за допомогою яких можна провести агрохімічне обстеження ґрунтового покриття. Наприклад, експрес-тести для аналізу ґрунту базуються на кольорових реакціях. Їхня точність часто залишає бажати кращого через швидке здійснення, що породжує нехтування всіма вимогами з коректного відбору ґрунтової проби, їх зберігання, висушування, подрібнення тощо.

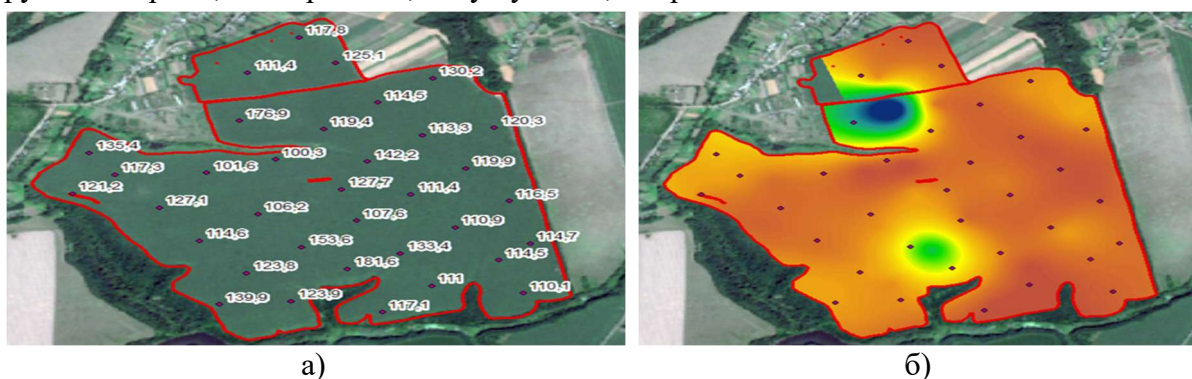


Рис.5. Просторове моделювання вмісту калію: точкові результати визначення вмісту калію у ґрунті (а), картограма розподілу вмісту калію, створена методом інтерполяції IDW (Inverse Distance Weighting) (б)

Джерело: власна розробка

На (рис.6) представлено картограму електропровідності ґрунту, створену на основі даних проксимального зондування, яке проводилося на полі із застосуванням польового сенсора. Метод вимірювання базувався на принципі електромагнітної індукції та дозволив отримати просторово-деталізовану картину розподілу електропровідності в межах усього масиву. Отримані значення варіюються в діапазоні від 2,21 до понад 31,8 мСм/см, що свідчить про виражену неоднорідність ґрунтового покриття.

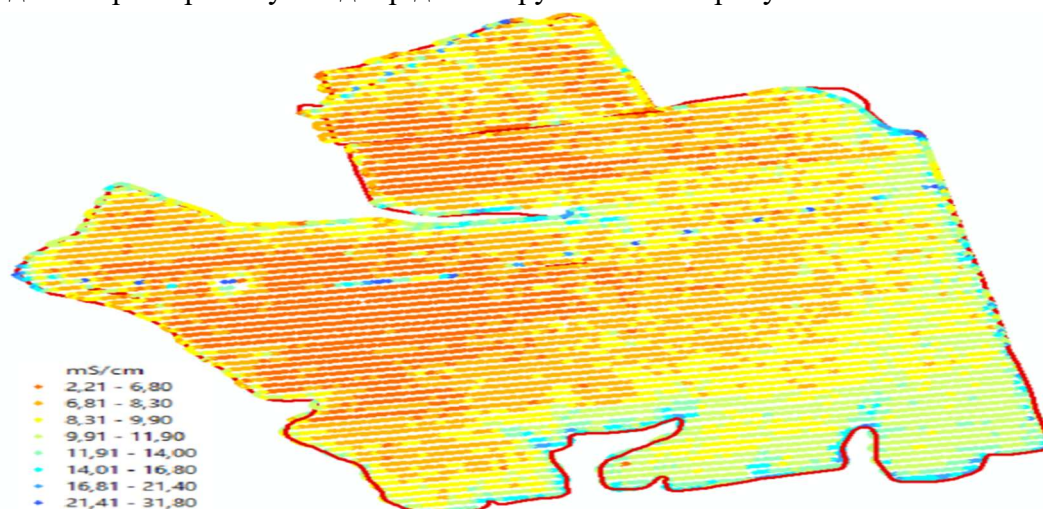


Рис. 6. Картограма електропровідності ґрунту

Джерело: власно розробка.

Електропровідність (ЕС) є інтегральним індикатором, який корелює з вологістю ґрунту, вмістом глинистих фракцій, ступенем засоленості, щільністю та катіонно-обмінною ємністю. Просторове зонування, яке спостерігається на картограмі, відображає зміну фізико-хімічних властивостей у межах одного поля, що може бути зумовлено як природними чинниками (рельєф, склад ґрунтоутворювальних порід), так і впливом господарської діяльності (ущільнення, нерівномірне зволоження, залишки добрив).

Наявність стабільних зон з низькою електропровідністю (до 6,3 мСм/см) свідчить про легкі за механічним складом ґрунти з низькою вологістю або недостатньою структурністю. Водночас підвищені значення (понад 16 мСм/см) можуть вказувати на важкі ґрунти з підвищеним вмістом глини, органіки або надмірною вологістю, зокрема в зонах водозатримання.

Отримані результати є основою для агрозонування поля та створення карт-завдань у системах точного землеробства. Зокрема, інформація про електропровідність може бути використана для планування диференційованого внесення добрив, змінної глибини обробітку ґрунту, регулювання норми висіву та інших адаптивних агротехнологій. Просторова структура, зафіксована на картограмі, підтверджує ефективність використання проксимального зондування як інструменту оперативної агродіагностики без потреби у масовому лабораторному аналізі. Таким чином, застосування подібних карт дозволяє приймати обґрунтовані рішення з підвищення ефективності господарювання на рівні окремого поля.

Цифровий моніторинг сільськогосподарської техніки передбачає постійне автоматизоване спостереження за параметрами роботи машин (тракторів, комбайнів, агрегатів) з використанням телематики та мережевих датчиків. Він дозволяє прогнозувати зношення, виявляти аномалії та підвищувати ефективність використання техніки (рис. 7).

Ель Гаучо_Шипівці_Поле 601_Harvest_2022-10-09_00							
FID	DISTANCE	SWATHWIDTH	SECTIONID	Time	Heading	Machine	
4786	2,801074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:23 PM	4,058516	1	
4785	2,825074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:22 PM	5,045803	1	
4784	2,801074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:21 PM	8,148354	1	
4783	2,837074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:20 PM	9,801734	1	
4802	2,779267	11,2	5438	10/9/2022 4:04:39 PM	21,82332	1	
4773	2,829074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:10 PM	23,247889	1	
4772	2,820074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:09 PM	26,136092	1	
4771	2,820074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:08 PM	29,375876	1	
4770	2,813074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:07 PM	32,145227	1	
834	2,598622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:31 PM	40,215181	1	
22839	1,911138	11,2	9102	10/10/2022 10:14:33 AM	41,96607	1	
827	2,734621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:24 PM	42,184625	1	
826	2,712622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:23 PM	42,599272	1	
833	2,645621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:30 PM	42,731721	1	
824	2,743622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:21 PM	43,341163	1	
825	2,682622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:22 PM	43,56747	1	
817	2,645621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:14 PM	43,794608	1	
829	2,688621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:26 PM	43,919391	1	
828	2,690622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:25 PM	44,129977	1	
831	2,662622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:28 PM	44,63776	1	
830	2,638622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:27 PM	44,794394	1	
832	2,631622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:29 PM	45,044442	1	
816	2,412622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:13 PM	45,380211	1	
22840	1,850138	11,2	9102	10/10/2022 10:14:34 AM	46,232146	1	
1930	2,272695	11,2	5438	10/9/2022 2:58:30 PM	46,973827	1	

Рис. 7. Зібрані зі зернозбирального комбайну (John Deere моделі: s770, s670) дані про траєкторію руху та орієнтацію техніки в полі, контроль ширини захвату, автоматичне відключення секцій та часові мітки запису, необхідні для синхронізації телеметрії з іншими даними (дані, надані агрокомпанією Agroseam)



Рис. 8. Картограма щільності проходів сільськогосподарської техніки, побудована авторами на основі GPS-даних телеметрії, методика зонування та візуалізації у середовищі ГІС (Джерело: власна розробка)

На рис. 8 зображено картограму щільності проходів сільськогосподарської техніки, побудовану на основі телеметричних GPS-даних, отриманих під час виконання агротехнічних операцій на полі. Візуалізація відображає кількість проходів техніки в різних зонах поля за допомогою кольорової шкали. Найменша кількість проходів (від 0,1 до 3,2) позначена синіми та блакитними відтінками. Ці ділянки могли бути оброблені лише один раз або залишитися поза увагою техніки. Жовті та світло-зелені зони (4,3–6,5 проходів) відповідають основній масі поля, де техніка рухалась стабільно та без надмірних перекриттів. Водночас червоні та оранжеві області (8,7–9,8 проходів) вказують на зони з надмірною кількістю проходів, що, ймовірно, є результатом повторних обробок, розворотів або нераціонального маршруту. Такий просторовий аналіз дозволяє виявити проблемні ділянки поля, оптимізувати логістику руху машин, зменшити витрати пального та рівномірно розподіляти агротехнічні навантаження. Картограма є важливим інструментом у системі точного землеробства, оскільки забезпечує візуальне представлення ефективності роботи техніки та дозволяє формувати рекомендації для автоматизованого планування маршрутів у наступних сезонах.

Завдяки геоінформаційним системам (рис. 9) можна візуалізувати карти затрат палива для ухвалення ефективних рішень.

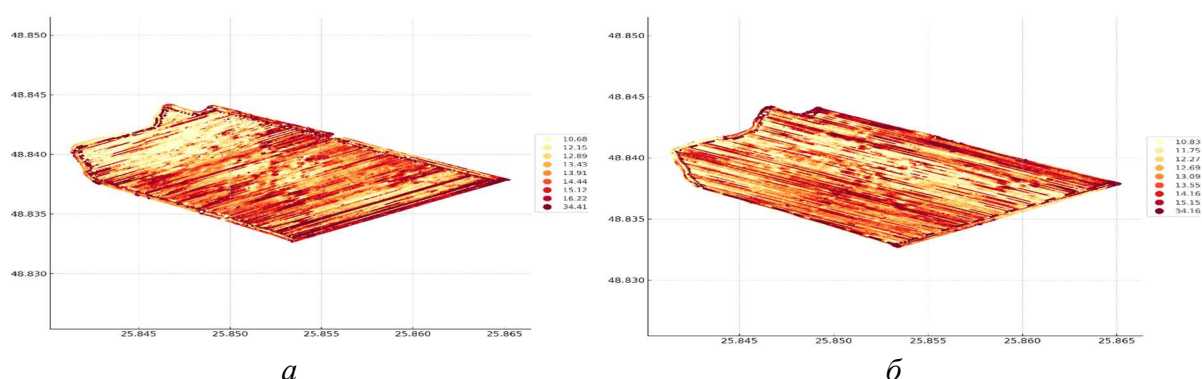


Рис. 9. Карти витрат пального для поля площею 117 га за 2021 та 2023 роки, побудовані авторами на основі телеметричних даних, наданих агрокомпанією «Агросем»

Джерело: власна розробка.

У результаті просторового аналізу телеметричних даних, зібраних під час виконання польових робіт у 2021 та 2023 роках на полі було виявлено суттєву зміну структури витрат пального, що свідчить про підвищення ефективності роботи сільськогосподарської техніки з часом (табл. 3).

Таблиця 3 – Витрати пального за даними геопросторового аналізу за 2021 та 2023 р. (дані, надані агрокомпанією Agrosem)

Клас	Середні витрати пального 2023 (л/га)	Середні витрати пального 2021 (л/га)	Різниця між (2023–2021) л/га
1	10,83	10,68	+0,15
2	11,75	12,15	-0,40
3	12,27	12,89	-0,62
4	12,69	13,43	-0,74
5	13,55	14,44	-0,89
6	14,16	15,12	-0,96
7	15,15	16,22	-1,07
8	34,16	34,41	-0,25

Джерело: власна розробка.

Згідно з аналізом отриманих теплових карт витрат пального за 2021 та 2023 роки, у 2023 році показники енергоспоживання на гектар виявилися нижчими в усіх класах, за винятком найнижчого (клас 1), що свідчить про вдосконалення технологічних процесів. Найбільш суттєве зменшення спостерігалось у класах з високими витратами пального, що вказує на впровадження змін у логістиці польових робіт: оптимізацію маршрутів техніки, уникнення перекриттів, а також покращення роботи обладнання, що зменшило навантаження на двигуни та підвищило енергоефективність.

Просторовий розподіл витрат пального у 2023 році був значно впорядкованішим порівняно з 2021 роком. На теплових картах чітко окреслювалися зони з різним рівнем витрат, що вказує на вищу узгодженість між картами-завдань і реальним виконанням робіт. Це, ймовірно, стало результатом аналізу телеметричних даних попередніх сезонів і їх подальшого використання для точного планування операцій. У 2021 році розподіл витрат був хаотичнішим і не демонстрував чіткої зональності, що ускладнювало прийняття диференційованих управлінських рішень на рівні поля.

Динаміка просторової варіативності витрат пального є не лише індикатором ефективності використання техніки, а й основою для подальшого планування в межах концепції точного землеробства. Дані про енергоспоживання можуть використовуватися для створення карт-завдань, адаптованих під окремі ділянки поля. Це дозволяє зменшити витрати пального, добрив, часу та інших ресурсів, одночасно знижуючи негативний вплив на довкілля.

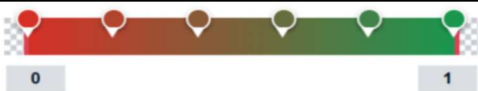
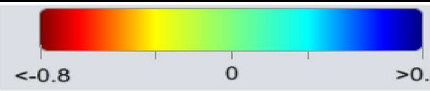
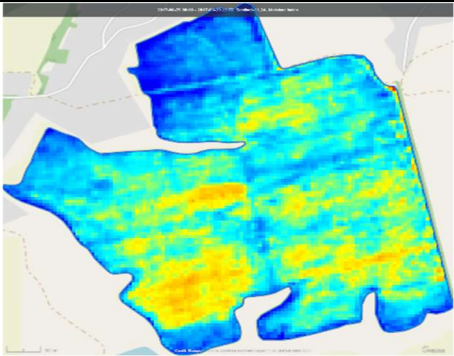
Паралельно з телеметриєю все ширше впроваджуються технології дистанційного зондування, які дають змогу оцінювати стан посівів і агроландшафту з різною просторовою деталізацією. Супутникові платформи забезпечують регулярний моніторинг великих площ, дозволяючи відстежувати стан рослин за допомогою часових рядів і виявляти зміни у вегетації. Вони особливо корисні на рівні поля або групи полів, де потрібна оперативність в ухваленні рішень.

Для локального моніторингу з високою точністю застосовуються безпілотні літальні апарати з мульти- і гіперспектральними сенсорами. Вони дозволяють виявляти проблемні ділянки - дефіцит поживних речовин, ураження шкідниками чи хворобами — ще до появи візуальних ознак. Теплові камери, встановлені на дронах або літаках, вимірюють температуру рослинного покриву, що є важливим показником водного стресу, транспірації та загального фізіологічного стану культур.

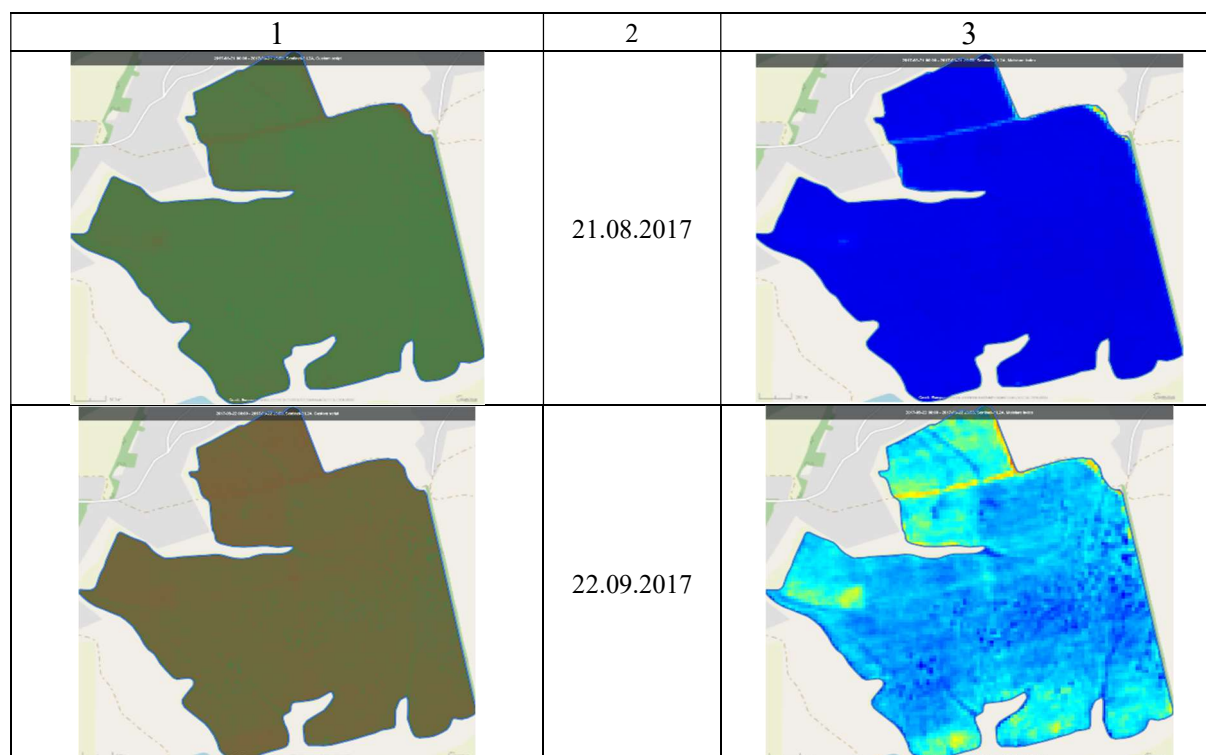
Спектральний аналіз у ближньому інфрачервоному діапазоні (700–1300 нм) дає змогу оцінювати площу листового апарату та загальний стан фотосинтетичних структур рослин. Найбільш поширеним показником є NDVI, що відображає співвідношення між поглинанням червоного світла та відбиттям інфрачервоного й дозволяє визначати інтенсивність росту та стан рослинного покриву. Для комплексної оцінки зволоженості використовується індекс NDMI, який чутливий до вмісту води в рослинах і ґрунті та допомагає виявляти періоди водного стресу. Поєднане використання NDVI та NDMI підвищує точність моніторингу посівів, дає змогу ідентифікувати фази активного росту та визначати потребу у зрошенні чи внесенні добрив (див. Таблицю 4). Моделі розвитку сільськогосподарських культур математично описують ріст рослин, баланс води та поживних речовин, фазову фенологію і реакцію культури на стреси (посуха, дефіцит азоту тощо) та хвороби. Наприклад, DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) — набір узгоджених моделей вирощування понад 40 сільськогосподарських культур, призначений для оцінки впливу погодних, ґрунтових, генетичних і управлінських факторів на врожайність.

Після інфікування рослин коливання спектральної відбивності, текстури або температури можуть бути виявлені аналізом знімків. БПЛА-платформи, обладнані гіперспектральними камерами, дозволяють побачити зміни кольору листя, пігментації та температури, спричинені хворобами та дають унікальні спектральні відбитки: використання гіперспектра дозволяє фіксувати ці «відбитки» на ранніх стадіях.

Таблиця 4 – Динаміка значень NDVI та NDMI для дослідного поля у Чернігівській області під кукурудзою на зерно на різних етапах вегетації (29.06–22.09.2017)

NDVI 1	Дата 2	NDMI 3
		
	29.06.2017	
	22.07.2017	

Закінчення табл. 4



Джерело: власна розробка

Динаміка вегетаційних індексів NDVI та NDMI упродовж вегетаційного періоду кукурудзи на зерно у Чернігівській області (29.06–22.09.2017 р.) відображає зміни фізіологічного стану посівів та рівня зволоження ґрунту. На початковому етапі (29.06.2017) NDVI становив 0,56, NDMI — 0,28, що відповідає фазі активного наростання листової маси. У середині сезону (22.07.2017) зафіксовано максимальні значення індексів (NDVI — 0,79; NDMI — 0,42), які свідчать про найвищу фотосинтетичну активність та оптимальний водний режим. Під час формування врожаю (21.08.2017) спостерігалось зниження NDVI до 0,73 та NDMI до 0,36, що може бути пов'язано з частковим водним стресом і початком дозрівання. Наприкінці сезону (22.09.2017) індекси зменшилися до 0,48 та 0,22 відповідно, що відображає завершення вегетаційних процесів і зменшення біомаси. Така динаміка дозволяє ідентифікувати періоди максимального росту та вразливості культури, що є основою для коригування агротехнічних заходів.

Паралельний аналіз NDMI, який є чутливим до змін вологості рослинного покриву та ґрунту, показав подібну загальну тенденцію, але з більш вираженими коливаннями у періоди недостатнього зволоження. Зростання індексу від 0,28 на початку сезону до максимуму 0,42 у фазі активного росту свідчить про сприятливий водний режим у цей період. Подальше зниження NDMI до 0,36 під час формування врожаю та до 0,22 наприкінці сезону вказує на поступове виснаження запасів води та можливий прояв водного стресу, що корелює зі спостереженнями зниження NDVI. Це підкреслює доцільність поєднання обох індексів для комплексної оцінки стану посівів.

Отже, поєднання даних цифрового моніторингу створює надійну базу для побудови адаптивної системи управління агротехнологіями. Завдяки цьому аграрії отримують змогу оперативно реагувати на зміну умов, планувати обробіток із врахуванням просторової неоднорідності та поступово впроваджувати принципи точного, ресурсоефективного та екологічно орієнтованого землеробства.

Висновки. Комплексне застосування агрохімічного, проксимального, телеметричного та дистанційного моніторингу дозволило виявити просторову неоднорідність ґрунтових та біофізичних характеристик дослідних полів, а також оцінити ефективність використання сільськогосподарської техніки.

Агрохімічний аналіз показав суттєві відмінності у вмісті елементів живлення та кислотності ґрунту навіть у межах одного поля. Такі результати підтверджують необхідність впровадження зонального управління родючістю, що дозволяє уникнути як надлишкового, так і недостатнього внесення добрив.

Дані проксимального зондування (електропровідність) виявили чітко окреслені зони з різними фізико-хімічними властивостями ґрунту. Встановлено, що високі значення електропровідності корелюють з важкими ґрунтами та зонами накопичення вологи, тоді як низькі значення характерні для легких ґрунтів з підвищеним ризиком посухи. Це створює підґрунтя для адаптивного планування глибини обробітку, поливу та норм внесення добрив.

Телеметричний моніторинг техніки засвідчив наявність локальних ділянок з надлишковими проходами агрегатів, що негативно впливає на структуру ґрунту і збільшує енерговитрати. Порівняння даних 2021 та 2023 років показало, що після оптимізації маршрутів та використання карт-завдань вдалося зменшити витрати пального на більшості ділянок, особливо у зонах з початково високим споживанням, що підтверджує ефективність інтеграції телеметрії в управлінські процеси.

Дистанційний аналіз посівів за супутниковими знімками Sentinel-2 та індексами NDVI/NDMI дозволив визначити фази активного росту та періоди водного стресу культур. Встановлено, що критичною фазою з точки зору водного забезпечення є період формування врожаю в період серпня поточних років, коли NDMI знизився на 14 % від пікового значення. Це дає змогу заздалегідь планувати зрошення та агротехнічні заходи для зменшення негативного впливу стресу на врожайність.

Інтеграція результатів у єдиному ГІС-середовищі забезпечила можливість просторової візуалізації ключових показників і формування карт-завдань для диференційованого внесення добрив та оптимізації руху техніки. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів, знизити витрати пального та мінімізувати негативний вплив на довкілля, що відповідає принципам точного та ресурсоефективного землеробства.

Список використаних джерел

1. Alif, M., & Hussain, M. (2024). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 100785. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100785>.
2. Akumaga, U., Gao, F., Anderson, M., Dulaney, W. P., Houborg, R., Russ, A., & Hively, W. D. (2023). Integration of Remote Sensing and Field Observations in Evaluating DSSAT Model for Estimating Maize and Soybean Growth and Yield in Maryland, USA. *Agronomy*, 13(6), 1540. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061540>.
3. Archbold, G., Parra, C., Carrillo, H., & Mouazen, M. A. (2023). Towards the implementation of ISFET sensors for in-situ and real-time chemical analyses in soils: A practical review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107828. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107828>.
4. Celikkan, U., Duran, T., & Kaya, Y. (2024). Early detection of plant stress using UAV-based thermal and hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108145>.
5. Chen, C.-J., Huang, Y.-Y., Li, Y.-S., Chen, Y.-C., Chang, C.-Y., & Huang, Y.-M. (2021b). Identification of fruit tree pests with deep learning on embedded drone to achieve accurate pesticide spraying. *IEEE Access*, 9, 21986–21997. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056082>.
6. Chodorek, A., Mazur, M., & Adamczyk, B. (2021). Wireless sensor networks in precision agriculture: State-of-the-art and future directions. *Agricultural Systems*, 191, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103152>.

7. Farmaha, B. S., Guzman, J., & Ferguson, R. B. (2020). Spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Geoderma*, 370, 114343. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114343>.
8. Gebbers, R. (2018). Proximal soil surveying and monitoring techniques. In *Precision agriculture for sustainability* (pp. 29–78). London: Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351114592>.
9. Graldi, F., Martínez, J. F., & Skok, M. (2023). Advances in satellite-based soil moisture estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103249>.
10. Grains Research and Development Corporation. (2023, March). Proximal soil sensing systems fact sheet. *Grains Research and Development Corporation*. https://grdc.com.au/__data/assets/pdf_file/0039/585669/GRDC_ProximalSoilSS_FS2211_Screen.pdf.
11. Hawkins S. E., Mueller, T. G., & Shearer, S. A. (2017). Use of electromagnetic induction for soil mapping. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.005>.
12. Hrdličková, Z. (2025). Application of IoT in agroecosystems: A review of sensor integration and communication protocols. *Agronomy*, 15(2), 321. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020321>.
13. Li, Z., Wang, X., & Zhang, H. (2022). Remote sensing and crop simulation model coupling for yield prediction. *Field Crops Research*, 285, 108606. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108606>.
14. Mahlein, A. K., Behmann, J., Kusk, M. T., & Kersting, K. (2024). Machine learning in plant stress detection: State-of-the-art and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108005>.
15. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., & Agustí-Panareda, A. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
16. Nikolaou, A., Papadopoulos, F., & Tsaniklidis, G. (2023). Multispectral and thermal UAV data for crop stress assessment. *Sensors*, 23(3), 712. <https://doi.org/10.3390/s23030712>.
17. National Scientific Centre “Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O. N. Sokolovskiy”. (2005). Soil quality: Method for determining potassium buffering capacity (DSTU 4375:2005). Author.
18. Panek-Chwastyk, M., Kowalski, P., & Wójcik-Gront, E. (2024). Simulation of sugar beet and maize yield using AquaCrop model under Polish conditions. *European Journal of Agronomy*, 140, 126681. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126681>.
19. Reddy, S. N., Manikiam, B., & Jeevalakshmi, D. (2017). Land surface temperature retrieval from LANDSAT data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(21), 9679–9687.
20. Schirrmann, M. (2011). Evaluation of mobile sensor platforms for soil mapping. *Sensors*, 11(7), 6380–6398. <https://doi.org/10.3390/s110706380>.
21. Scholz, M., Gebbers, R., & Duttman, R. (2014). Evaluation of a penetrometer-based soil strength measurement system. *Soil and Tillage Research*, 136, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.012>.
22. Sinha, S., & Pal, T. (2022). A comprehensive review of FET-based pH sensors: Materials, fabrication technologies, and modeling. *Electrochem Science Advances*, 2, e202100147. <https://doi.org/10.1002/elsa.202100147>.
23. Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>.
24. European Commission. (2024). The Environmental Benefits of Digital Agriculture. *European Commission Report*. <https://ec.europa.eu/environment/agriculture-digital-benefits-2024>.
25. Van Wesemael, B., Montanarella, L., & Jones, R. J. A. (2024). Soil monitoring in Europe: The role of remote sensing. *Science of the Total Environment*, 856, 159931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159931>.
26. WeedsGalore Dataset. (2025). Annotated aerial dataset for weed and crop classification. <https://www.weedsgalore-dataset.org>.

27. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
28. Яцук І. П., Балюк С. А. Методика проведення агрохімічної паспортизації сільськогосподарських угідь. 2-ге вид., 108 с. Київ: Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», 2019.
29. Зацерковний, В. ., & Ворох, В. (2024). Диференційні технології прецизійного землеробства. *Технічні науки та технології*, (1 (35), 292–301. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-292-301](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-292-301).
30. Semeniaka, V., Zatserkovnyi, V., Vorokh, V., Ilyin, L., & Mironchuk, T. (2024). Differential technologies for precision agriculture. *У International conference of young professionals «geoterrace-2024»* (с. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510098>.
31. Zatserkovnyi, V., Vorokh, V., Hloba, O., Mironchuk, T., & Siuiva, I. (2025b). *Soil monitoring in precision farming technologies* [Моніторинг ґрунтів у технологіях точного землеробства]. In *XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”* (14–17 April, Kyiv). <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-057.pdf>.

References

1. Alif, M., & Hussain, M. (2024). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 100785. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100785>.
2. Akumaga, U., Gao, F., Anderson, M., Dulaney, W. P., Houborg, R., Russ, A., & Hively, W. D. (2023). Integration of Remote Sensing and Field Observations in Evaluating DSSAT Model for Estimating Maize and Soybean Growth and Yield in Maryland, USA. *Agronomy*, 13(6), 1540. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061540>.
3. Archbold, G., Parra, C., Carrillo, H., & Mouazen, M. A. (2023). Towards the implementation of ISFET sensors for in-situ and real-time chemical analyses in soils: A practical review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107828. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107828>.
4. Celikkan, U., Duran, T., & Kaya, Y. (2024). Early detection of plant stress using UAV-based thermal and hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108145>.
5. Chen, C.-J., Huang, Y.-Y., Li, Y.-S., Chen, Y.-C., Chang, C.-Y., & Huang, Y.-M. (2021b). Identification of fruit tree pests with deep learning on embedded drone to achieve accurate pesticide spraying. *IEEE Access*, 9, 21986–21997. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056082>.
6. Chodorek, A., Mazur, M., & Adamczyk, B. (2021). Wireless sensor networks in precision agriculture: State-of-the-art and future directions. *Agricultural Systems*, 191, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103152>.
7. Farmaha, B. S., Guzman, J., & Ferguson, R. B. (2020). Spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Geoderma*, 370, 114343. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114343>.
8. Gebbers, R. (2018). Proximal soil surveying and monitoring techniques. In *Precision agriculture for sustainability* (pp. 29–78). London: Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351114592>.
9. Galdi, F., Martínez, J. F., & Skok, M. (2023). Advances in satellite-based soil moisture estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103249>.
10. Grains Research and Development Corporation. (2023, March). Proximal soil sensing systems fact sheet. *Grains Research and Development Corporation*. https://grdc.com.au/__data/assets/pdf_file/0039/585669/GRDC_ProximalSoilSS_FS2211_Screen.pdf.
11. Hawkins S. E., Mueller, T. G., & Shearer, S. A. (2017). Use of electromagnetic induction for soil mapping. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.005>.
12. Hrdličková, Z. (2025). Application of IoT in agroecosystems: A review of sensor integration and communication protocols. *Agronomy*, 15(2), 321. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020321>.

13. Li, Z., Wang, X., & Zhang, H. (2022). Remote sensing and crop simulation model coupling for yield prediction. *Field Crops Research*, 285, 108606. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108606>.
14. Mahlein, A. K., Behmann, J., Kuska, M. T., & Kersting, K. (2024). Machine learning in plant stress detection: State-of-the-art and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108005>.
15. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., & Agustí-Panareda, A. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
16. Nikolaou, A., Papadopoulos, F., & Tsaniklidis, G. (2023). Multispectral and thermal UAV data for crop stress assessment. *Sensors*, 23(3), 712. <https://doi.org/10.3390/s23030712>.
17. National Scientific Centre “Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O. N. Sokolovskiy”. (2005). Soil quality: Method for determining potassium buffering capacity (DSTU 4375:2005). Author.
18. Panek-Chwastyk, M., Kowalski, P., & Wójcik-Gront, E. (2024). Simulation of sugar beet and maize yield using AquaCrop model under Polish conditions. *European Journal of Agronomy*, 140, 126681. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126681>.
19. Reddy, S. N., Manikiam, B., & Jeevalakshmi, D. (2017). Land surface temperature retrieval from LANDSAT data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(21), 9679–9687.
20. Schirrmann, M. (2011). Evaluation of mobile sensor platforms for soil mapping. *Sensors*, 11(7), 6380–6398. <https://doi.org/10.3390/s110706380>.
21. Scholz, M., Gebbers, R., & Duttman, R. (2014). Evaluation of a penetrometer-based soil strength measurement system. *Soil and Tillage Research*, 136, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.012>.
22. Sinha, S., & Pal, T. (2022). A comprehensive review of FET-based pH sensors: Materials, fabrication technologies, and modeling. *Electrochem Science Advances*, 2, e202100147. <https://doi.org/10.1002/elsa.202100147>.
23. Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>.
24. European Commission. (2024). The Environmental Benefits of Digital Agriculture. *European Commission Report*. <https://ec.europa.eu/environment/agriculture-digital-benefits-2024>.
25. Van Wesemael, B., Montanarella, L., & Jones, R. J. A. (2024). Soil monitoring in Europe: The role of remote sensing. *Science of the Total Environment*, 856, 159931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159931>.
26. WeedsGalore Dataset. (2025). Annotated aerial dataset for weed and crop classification. <https://www.weedsgalore-dataset.org>.
27. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
28. Yatsuk, I. P., & Balyuk, S. A. (2019). Metodyka provedennia ahrokhimichnoi pasportyzatsii silskohospo-darskykh uhid [Methodology for conducting agrochemical certification of agricultural land (2nd ed., 108 pp.)]. State Institution "Institute of Soil Protection of Ukraine. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.1.2019>.
29. Zatserkovnyi, V. I., & Vorokh, V. V. (2024). Dyferentsiini tekhnologiiu pretsyziinoho zemlerobstva [Differential technologies of precision agriculture]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Engineering sciences and technologies*, 1(35), 292–301. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-292-301](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-292-301).
30. Zatserkovnyi, V. I., Vorokh, V. V., Samko, M. V., & Ilchenko, A. S. (2025). Monitoring using UAVs in precision farming technologies. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, XVIII, Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510098>.
31. Zatserkovnyi, V., Vorokh, V., Hloba, O., Mironchuk, T., Siuiva, I. (2025 6). Soil monitoring in precision farming technologies. XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 14-17 April, Kyiv. Retrieved from <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-057.pdf>.

Отримано 19.08.2025

Victor Vorokh¹, Olga Hloba²¹graduate student of the Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>²master of Science of the Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: olgagloba73@knu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-4923-3374>

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DIGITAL MONITORING IN AGRICULTURE

Digital monitoring is a key tool in the development of precision agriculture, providing timely assessment of the state of agroecosystems and enabling spatially justified management of technological processes. Under conditions of increasing resource pressure, climate change, and variability of soil conditions, there is a need for a comprehensive analysis of parameters influencing crop yields. The relevance of this research lies in the necessity of implementing innovative digital technologies in agriculture, which can improve production efficiency, adaptability to environmental conditions, and reduce resource losses.

The main approaches applied include agrochemical analysis (nitrogen, phosphorus, potassium content, acidity), spatial sensing of soil electrical conductivity to detect structural differences, as well as remote sensing using Sentinel-2 satellite data for calculating the NDVI vegetation index. Additionally, telemetry data from field machinery were used, which made it possible to assess the efficiency of technological operations, particularly mapping fuel consumption.

The results obtained are presented in the form of thematic maps and tables illustrating the spatial variability of key indicators. The study revealed significant heterogeneity of soil characteristics within a single field, confirmed by both agrochemical results and electrical conductivity indicators. Spatial differences in NDVI values indicate heterogeneous crop development caused by a combination of soil, climatic, and technological factors. Analysis of telemetry data revealed trends toward route optimization and rationalization of machinery use, which indirectly affects the energy efficiency of field operations.

The integration of digital monitoring methods — agrochemical, electrophysical, telemetry, and remote sensing — provides a multidimensional understanding of the state of agroecosystems. This approach enables well-founded decisions regarding site-specific management, reduces the risks of resource overuse, and establishes a foundation for the sustainable development of agricultural production.

Keywords: digital monitoring, precision agriculture (PA), geographic information systems (GIS), telemetry, remote sensing (RS), vegetation indices, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), agrochemical analysis, mapping, resource efficiency, spatial analysis, agrotechnologies.

Fig.: 9. References: 31.