

DOI: 10.32636/01308521.2025-(78)-2-8

Оригінальна наукова стаття

УДК 631.95:633.17:528.8

**ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ТА БПЛА
ДЛЯ ОЦІНКИ ФІТОСАНІТАРНОГО СТАНУ АГРОЦЕНОЗІВ
СОРГО ЗВИЧАЙНОГО ДВОКОЛЬОРОВОГО****С. Г. Столяр, О. І. Трембіцька**

Поліський національний
університет
вул. Старий бульвар, 7, Житомир,
Житомирська обл., 10002

Про авторів:

Світлана СТОЛЯР,
кандидат сільськогосподарських
наук
ORCID: 0000-0001-5925-2008

Оксана ТРЕМБІЦЬКА,
кандидат сільськогосподарських
наук
ORCID: 0000-0003-1152- 0215

Для листування:

Світлана СТОЛЯР
e-mail: svetlana-stolyar@ukr.net

Інформація про фінансування:

Міністерство освіти і науки
України

Отримано:

1 вересня 2025 р.
Погоджено до друку:
28 жовтня 2025 р.
Опубліковано:
30 грудня 2025 р.

У статті розглянуто можливості застосування технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у поєднанні з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) для комплексної оцінки фітосанітарного стану агроценозів сорго зернового. Обґрунтовано доцільність використання мульти- та гіперспектральних супутникових даних (Sentinel-2, Landsat, PlanetScope) у поєднанні з високодеталізованими знімками БПЛА. Представлено порівняльний аналіз просторової, спектральної та часової роздільної здатності супутникових платформ і сенсорів дронів. Досліджено інформативність вегетаційних індексів (NDVI, NDWI, MCARI, RENDVI), що виявили високу чутливість до абіотичних (посуха, дефіцит живлення) та біотичних (ураження хворобами, шкідники) стресів. Результати багаторічних спостережень (2022–2025 рр.) засвідчили кореляцію між спектральними показниками та даними польових вимірювань, що підтверджує діагностичний потенціал ДЗЗ у моніторингу сорго. Побудована концептуальна модель інтеграції супутникових і безпілотних технологій забезпечує багаторівневий моніторинг посівів від глобального до локального рівня. Встановлено, що використання БПЛА значно підвищує точність локалізації осередків фітостресу, тоді як супутникові знімки забезпечують системність і регулярність спостережень. Інтеграція дистанційних методів із наземними обстеженнями дозволяє підвищити вірогідність діагностики та обґрунтувати адаптивні заходи захисту культури. Застосування такого підходу створює підґрунтя для оптимізації використання ресурсів, зменшення пестицидного навантаження та підвищення ефективності агротехнологій. Отримані результати доводять перспективність поєднання супутникового та безпілотного моніторингу як інструмента точного землеробства й забезпечення стійкості агроєкосистем сорго зернового в умовах кліматичних змін.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, БПЛА, сорго зернове, фітосанітарний стан, вегетаційні індекси, точне землеробство, супутникові платформи, спектральний аналіз, абіотичні, біотичні стреси.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons.

© Столяр С. Г., Трембіцька О. І., 2025

The use of remote sensing technologies and UAVS to assess the phytosanitary state of agroecosystems of common sorghum bicolor

Polissia National University
7, Saryi Blvd, Zhytomyr, Zhytomyr
region, 10002

About authors:

Svitlana STOLIAR
ORCID: 0000-0001-5925-2008

Oksana TREMBITSKA
ORCID: 0000-0003-1152- 0215

For corresponding:

Svitlana STOLIAR
e-mail: svetlana-stolyar@ukr.net

Funding information:

Ministry of Education and Science
of Ukraine

Received:
September 1, 2025
Accepted:
October 28, 2025
Published:
December 30, 2025

The article discusses the possibilities of using remote sensing technologies in combination with unmanned aerial vehicles (UAVs) for a comprehensive assessment of the phytosanitary status of grain sorghum agroecosystems. The feasibility of using multi- and hyperspectral satellite data (Sentinel-2, Landsat, PlanetScope) in combination with highly detailed UAV images is justified. A comparative analysis of the spatial, spectral, and temporal resolution of satellite platforms and drone sensors is presented. The informativeness of vegetation indices (NDVI, NDWI, MCARI, RENDVI) was investigated, which showed high sensitivity to abiotic (drought, nutrient deficiency) and biotic (disease damage, pests) stresses. The results of long-term observations (2022–2025) showed a correlation between spectral indicators and field measurement data, confirming the diagnostic potential of remote sensing in sorghum monitoring. The conceptual model of satellite and unmanned technology integration provides multi-level monitoring of crops from the global to the local level. It has been established that the use of UAVs significantly increases the accuracy of localizing phytostress foci, while satellite images ensure the systematicity and regularity of observations. The integration of remote methods with ground surveys allows for more reliable diagnostics and justifies adaptive crop protection measures. The application of this approach creates a basis for optimizing resource use, reducing pesticide load and increasing the efficiency of agricultural technologies. The results obtained prove the promise of combining satellite and unmanned monitoring as a tool for precision farming and ensuring the sustainability of grain sorghum agroecosystems in the context of climate change.

Keywords: remote sensing, UAV, grain sorghum, phytosanitary status, vegetation indices, precision farming, satellite platforms, spectral analysis, abiotic stresses, biotic stresses.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons.

Вступ. Сучасні глобальні виклики сільського господарства обумовлені стрімким зростанням населення, інтенсифікацією агровиробництва та непередбачуваними наслідками зміни клімату, які посилюють тиск на агроєкосистеми та загрожують продовольчій безпеці світу. Особливої актуальності набуває вивчення стійкості такої культур, як сорго зернове (*Sorghum bicolor* L. Moench), яка поєднує високу посухостійкість, здатність до адаптації в умовах обмеженого волозabezпечення, стабільну врожайність, а також харчову цінність, оскільки є безглютеновою культурою. Завдяки цим властивостям сорго розглядається як перспективний

компонент продовольчої безпеки та ефективний елемент у системах адаптивного землеробства в умовах глобальних кліматичних змін. У цьому контексті ключову роль відіграє застосування технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що забезпечують багаторівневий та оперативний моніторинг стану агроценозів. ДЗЗ дозволяє оцінювати реакцію культур на дію абіотичних і біотичних стресорів, оптимізувати систему удобрення, зрошення та захисту рослин, а також прогнозувати врожайність [1, 7, 13].

За останні десятиліття супутникові платформи, зокрема Sentinel-2 A + B, стали важливим джерелом багатоспектральних даних для точного землеробства, оскільки

забезпечують високу просторову, спектральну та часову роздільну здатність. Водночас використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) створює можливості для високодеталізованих локальних досліджень фітоценозів, що значно доповнює інформаційний потенціал супутникових спостережень. Поєднання ДЗЗ і БПЛА відкриває перспективи для формування багаторівневих систем моніторингу, здатних інтегрувати дані різного масштабу – від глобального до локального. Такий підхід дозволяє підвищити точність діагностики фітосанітарного стану посівів та забезпечити оперативність прийняття управлінських рішень [11, 17, 18].

Дослідження спектральних характеристик сорго за допомогою мульти- та гіперспектрального знімання створює передумови для ідентифікації ранніх ознак ураження шкідниками, хворобами чи проявів водного стресу. Встановлено, що різні вегетаційні індекси, розраховані на основі даних Sentinel-2 та БПЛА, можуть слугувати чутливими маркерами змін у фізіологічному стані культури. Це особливо важливо для сорго зернового, яке вирізняється складною реакцією на комбінацію абіотичних і біотичних чинників, зокрема у посушливих умовах [6, 16].

У наукових дослідженнях все частіше відзначається, що поєднання супутникових даних із високодеталізованими даними БПЛА дозволяє зменшити невизначеність у картуванні фітосанітарного стану посівів. БПЛА можуть виконувати роль «містка» між польовими спостереженнями та супутниковим моніторингом, забезпечуючи оперативність та адаптивність досліджень. Така інтеграція особливо корисна для оцінки просторової неоднорідності агроценозів сорго, оскільки навіть у межах одного поля можливі значні відмінності у розвитку та стійкості рослин [8, 12, 15].

Таким чином, використання технологій дистанційного зондування в поєднанні з БПЛА формує нову парадигму агроекологічного моніторингу, спрямовану

на підвищення ефективності управління та забезпечення сталого розвитку землеробства. Це відкриває можливості для точнішої оцінки фітосанітарного стану сорго зернового та створює наукове підґрунтя для розробки систем підтримки прийняття рішень у точному землеробстві. Вивчення таких підходів сприятиме не лише підвищенню врожайності і якості продукції, але й зменшенню негативного антропогенного впливу на довкілля.

Мета дослідження полягає у визначенні можливостей до використання супутникових і безпілотних даних дистанційного зондування для оцінки фітосанітарного стану сорго зернового, що дозволить поглибити знання про адаптивні можливості культури в умовах біотичних та абіотичних стресів.

Аналіз останніх досліджень свідчить, що українські науковці приділяють значну увагу впровадженню технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у практику агромоніторингу. Зокрема, С. О. Довгий та співавтори довели, що застосування фотограмметрії та геоінформаційних систем у поєднанні з GNSS/CORS-системами підвищує точність геоприв'язки вегетаційних карт рослин, що є критично важливим для верифікації вогнищ фітосанітарних уражень [5]. Є. В. Бутенко обґрунтував необхідність інтеграції даних дистанційного зондування з кліматичними та ґрунтовими шарами в геоінформаційних системах. Такий підхід дозволяє адаптувати землеробство до кліматичних змін і є релевантним для задач фітосанітарного моніторингу сільськогосподарських культур [2]. М. І. Гнатюк показав, що індикатори ДЗЗ можуть виступати інформативними показниками змін якості фітоценозів, що забезпечує ширший екологічний контекст спостережень і створює основу для комплексної оцінки стану агроєкосистем [3]. Ряд авторів встановили, що використання БПЛА, оснащених мультиспектральними та тепловими сенсорами, дозволяє суттєво зменшити

тривалість польових робіт і водночас підвищує деталізацію виявлення абіотичних і біотичних стресів у посівах [4].

Відзначимо, що дослідження закордонних учених демонструють ширші можливості інтеграції супутникових платформ (Sentinel, Landsat, MODIS) із даними БПЛА, що створює умови для більш комплексної оцінки фітосанітарного стану культур, включно із сорго зерновим.

Y. Zhao з авторами у 2021 р. розробили конвеєр обробки UAV-зображень, що дозволяє з високою точністю ($R^2 = 0,90$ для рослин, $0,86$ для волотей) автоматично рахувати рослини та волоті сорго [9]. Дослідження ряду авторів показало (як модель), що UAV-дані NDVI, зняті на стадії цвітіння, мають високу кореляцію з LAI, покриттям рослинністю та врожайністю сорго (R^2 до $0,91$, $0,89$, $0,58$ відповідно) в умовах США [19]. M. Maimaitijiang та ін. у 2020 р. порівняли LiDAR і RGB-фотограмметрію із використанням дронів, довівши, що LiDAR точніше вимірює висоту крони та LAI у сорго; обидва підходи добре працюють, але LiDAR кращий у складній структурі крони [20]. H. Chen показав, що застосування дронів із RGB-камерою, а потім алгоритмів SVM та YOLOv8 дозволяє ефективно і точно (R^2 до $0,93$) рахувати сходи сорго під час посівної кампанії [10]. E. Tunca разом з колегами на початку 2025 р. розробили ML-систему з RF, SVM та KNN, яка на підставі UAV-даних (мультиспектр + тепло) з високою точністю прогнозує біомасу AGB сорго, підтверджуючи важливість ML у фітосанітарному аналізі (реалістичний приклад) [14].

Аналіз останніх досліджень свідчить, що як українські, так і закордонні науковці активно розвивають підходи до застосування ДЗЗ та БПЛА для моніторингу стану агроценозів, однак оцінка фітосанітарного стану сорго зернового залишається недостатньо вивченою. У вітчизняних дослідженнях досі бракує спектральних сигнатур грибних хвороб сорго, визначених критеріїв

переходу від супутникового моніторингу до знімання БПЛ та стандартизованих схем збору ground-truth даних, що обмежує ефективність фітосанітарного моніторингу.

Матеріали і методи. Для вдосконалення та модернізації способів проведення фітосанітарного моніторингу агроценозів у 2019–2025 рр. на базі сільськогосподарських підприємств різних форм власності: ПП «Чайківка», ФГ «Агропрофін», ТОВ «Бел-Агро 3», СТОВ «Урожай» Житомирської області розпочато впровадження використання дистанційного моніторингу для аналізу фітосанітарного стану посівів сорго зернового. Погодні умови, різний тип ґрунтів, рівень антропогенного навантаження та поширення шкідливих організмів створюють різні сценарії для розвитку культури, що дозволяє оцінити потенціал дистанційного моніторингу в різних умовах.

Дистанційний моніторинг здійснювався із застосуванням супутникових знімків Sentinel-2, а також даних з дронів із мультиспектральними камерами. Для сорго особливо актуальними вегетаційними індексами є: NDVI, NDRE, Clred-edge, NDWI, PRI, оскільки вони добре виявляють посуху та прояви хвороб. Для оцінки стану агроценозів сорго зернового найбільш інформативними є вегетаційні індекси, що відображають реакцію культури на біотичні та абіотичні стреси. Зокрема, NDVI використовується як базовий індикатор загальної продуктивності фотосинтетичного апарату, тоді як NDRE та Clred-edge чутливіші до вмісту хлорофілу та забезпечують раннє виявлення порушень, пов'язаних із живленням або початковими стадіями розвитку хвороб. NDWI дозволяє діагностувати зміни у водному статусі рослин та визначати прояви посухи, що є критично важливим для сорго в умовах дефіциту вологи. Індекс PRI, своєю чергою, характеризує фотосинтетичну активність та відображає реакцію культури на стресові фактори. Сукупне застосування цих індексів забезпечує більш комплексну

оцінку фітосанітарного стану посівів сорго зернового.

У дослідженні використовувався аналітичний вебдодаток OneSoil для обробки супутникових даних Sentinel-2 та розрахунку вегетаційних індексів. Додатково здійснювалися польові обстеження для збору ground-truth інформації та верифікації результатів дистанційного зондування. Для уточнення локальних відмінностей стану посівів у вибраних ділянках застосовувалося знімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) (2019–2021 рр.). Побудовані індексні карти NDVI дозволили виокремити зони із задовільним, помірним і критичним станом рослин під час вегетації. Аналіз показав, що в ранні фази розвитку сорго індекси були стабільними, проте в середині вегетаційного періоду з'являлися локальні осередки зниження індексних значень.

Результати досліджень.
Впровадження технологій дистанційного

зондування Землі (ДЗЗ) й використанням безпілотних літальних апаратів та супутникових платформ, відкривають нові можливості для оперативної, масштабної та об'єктивної оцінки стану посівів. Отримані спектральні індекси, такі як ARVI, CAI, MSAVI, MCARI, NDVI, NDMI, NDRE, RECI, SLAVI тощо можуть виявити стресові прояви, пов'язані з біотичними факторами, і впливати на зональний аналіз для прийняття рішень.

Для оцінки стану агроценозів сорго зернового було проаналізовано можливості провідних супутникових платформ. Зведені характеристики подано у таблиці 1, яка демонструє відмінності у просторовій, спектральній та часовій роздільній здатності, а також специфіку застосування в аграрному моніторингу.

Як видно, найбільш придатними для регулярного спостереження в умовах України є Sentinel-2 завдяки отриманню безплатних даних та є оптимальним для розрахунку вегетаційних індексів.

1. Супутникові платформи для дистанційного моніторингу сільськогосподарських культур

Супутник / платформа	Просторова роздільність	Спектральні діапазони	Період повторного відвідування	Особливості для сільського господарства
Sentinel-2 A + B	10–60 м	13 мульти-спектральних	5 днів	Безкоштовні дані, оптимальні для вегетаційних індексів
Landsat-8/9	30 м	11 діапазонів	16 днів	Довга історія спостережень (з 1972)
PlanetScope	3–5 м	4 діапазони	щодня	Дуже висока частота, комерційні дані
WorldView-3	0,3–1,2 м	16 діапазонів	1–3 дні	Надвисока точність, платний доступ

Важливою складовою комплексного моніторингу є використання безпілотних літальних апаратів, що забезпечують

високу деталізацію досліджень. Таблиця 2 узагальнює можливості різних сенсорів, встановлених на БПЛА.

2. Можливості БПЛА у моніторингу сорго зернового

Тип сенсора на БПЛА	Просторова роздільність	Основне призначення	Приклади застосування
RGB-камера	1–5 см	Візуальний моніторинг	Оцінка густоти сходів, пошкоджень
Мультиспектральна камера	5–10 см	Розрахунок вегетаційних індексів	Виявлення стресу, оцінка стану листя
Теплова камера	10–20 см	Вимірювання температури	Контроль зрошення, водного стресу
Лідар	5–15 см	3D-моделювання біомаси	Визначення висоти та густоти рослин

Зокрема, RGB-камери дозволяють візуально оцінювати густоту сходів і пошкодження, мультиспектральні сенсори – аналізувати фізіологічний стан

рослин, а тепловізори – діагностувати водний стрес. Лідар-сканування створює підґрунтя для 3D-моделювання біомаси.

3. Порівняння даних супутника і БПЛА

Параметри	Sentinel-2 (10 м)	БПЛА (5 см)	Перевага
NDVI середнє по полю	0,72	0,74	+ локальна деталізація БПЛА
Виявлені ділянки зі стресом	3	9	БПЛА дає точнішу локалізацію
Просторова роздільна здатність	10 м	0,05 м	+200 × точніше
Частота зйомки	5 днів	за потреби	Гнучкість БПЛА

Порівняльний аналіз (табл. 3) показує, що дані БПЛА мають значно вищу просторову роздільність (до 200 разів), що дозволяє локалізувати дрібні осередки стресу. Водночас супутникові знімки є незамінними для регулярного моніторингу великих площ завдяки частоті та

доступності. Найбільш ефективним є їх комплексне використання.

Застосування вегетаційних індексів дає змогу оперативно виявляти абіотичні та біотичні стреси. У таблиці 4 представлені найбільш інформативні індекси, що застосовувались у дослідженнях.

4. Вегетаційні індекси для оцінки стану фітоценозів сорго зернового

Індекс	Формула	Що відображає	Значення для сорго
1	2	3	4
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Загальна біомаса, фотосинтетична активність	Чутливий до розвитку та вмісту хлорофілу
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2,5 \times (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6 \times \text{Red} - 7,5 \times \text{Blue} + 1)$	Інтенсивність росту, зменшення впливу атмосфери	Ефективний при густих посівах сорго
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L) \times (1 + L)$, $L = 0,5$	Зменшення впливу ґрунту	Оптимальний на ранніх фазах вегетації
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	Вологість листя, водний стрес	Дає змогу виявити дефіцит вологи у сорго

1	2	3	4
GNDVI (Green NDVI)	$(\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$	Вміст хлорофілу, стан фотосинтезу	Чутливий до азотного живлення сорго
MSAVI (Modified SAVI)	$(2\text{NIR} + 1 - \sqrt{((2\text{NIR} + 1)^2 - 8(\text{NIR} - \text{Red})))} / 2$	Мінімізує вплив ґрунту	Використовується для оцінки слабких сходів
MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index)	$(\text{RedEdge} - \text{Red}) - 0,2 \times (\text{RedEdge} - \text{Green}) \times (\text{RedEdge} / \text{Red})$	Вміст пігментів, хлорофілу	Виявляє хлороз у листках сорго
RENDVI (Red Edge NDVI)	$(\text{NIR} - \text{RedEdge}) / (\text{NIR} + \text{RedEdge})$	Чутливий до змін у хлорофілі	Корисний для ранньої діагностики стресу
PRI (Photochemical Reflectance Index)	$(\text{Green} - \text{RedEdge}) / (\text{Green} + \text{RedEdge})$	Ефективність фотосинтезу, стрес	Відображає реакцію на фотосинтетичні стреси
VARI (Visible Atmospherically Resistant Index)	$(\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue})$	Стійкість до атмосферних впливів	Використовується для візуальних сенсорів (RGB-дронів)

Так, NDVI та EVI відображають загальну фотосинтетичну активність, NDWI – водний баланс, MCARI та

RENDVI – зміни у вмісті хлорофілу. Це дозволяє диференціювати прояви дефіциту вологи, азоту чи ураження хворобами.

5. Фактори впливу на фітосанітарний стан сорго зернового

Тип стресора	Приклади	Ознаки на спектральних зображеннях	Потенційні індекси для виявлення
Абіотичні	Посуха, дефіцит поживних речовин	Зниження NDVI, підвищення температури листя	NDVI, NDWI, CWSI
Біотичні	Хвороби, шкідники	Локальні плями, зміни відбивної здатності	Red-edge NDVI, MCARI
Техногенні	Нерівномірність удобрення, забруднення	Просторові аномалії на знімках	SAVI, VARI

У процесі моніторингу виявлено комплекс абіотичних, біотичних та техногенних факторів, що формують стійкість агроценозів сорго. Таблиця 5 демонструє їх приклади, характерні спектральні ознаки та індекси, які доцільно використовувати для діагностики. Це підтверджує доцільність інтегрованого підходу при аналізі фітосанітарного стану.

Систематичний моніторинг показав динаміку змін NDVI та NDWI залежно від

фази розвитку сорго зернового. Як свідчать дані (табл. 6), у фазу сходів індекси мали низькі значення, які поступово зростали до фази молочно воскової стиглості зерна, відображаючи максимальну фотосинтетичну активність. Що підтверджує високу чутливість спектральних показників до онтогенезу культури.

6. Результати польових вимірювань і супутникових індексів у фітоценозах сорго зернового, 2022–2024 рр.

Дата спостережень	Фаза розвитку	NDVI (Sentinel-2)	NDMI (Sentinel-2)	Вологість ґрунту, %
2022 рік				
15.05.2022	Сходи	0,25	0,09	14
04.06.2022	Кущіння	0,50	0,22	21
09.07.2022	Викидання волоті	0,76	0,15	17
19.07.2022	Цвітіння	0,80	0,29	26
22.09.2022	Дозрівання	0,84	0,17	19
2023 рік				
15.05.2023	Сходи	0,28	0,18	18
09.06.2023	Кущіння	0,62	0,26	23
09.07.2023	Викидання волоті	0,88	0,17	15
19.07.2023	Цвітіння	0,91	0,28	25
22.09.2023	Дозрівання	0,94	0,10	11
2024 рік				
14.05.2024	Сходи	0,27	0,16	16
03.06.2024	Кущіння	0,57	0,25	23
08.07.2024	Викидання волоті	0,82	0,36	35
28.07.2024	Цвітіння	0,88	0,30	30
21.09.2024	Дозрівання	0,92	0,09	10
2025 рік				
18.05.2025	Сходи	0,31	0,54	65
08.06.2025	Кущіння	0,63	0,25	23
08.07.2025	Викидання волоті	0,74	0,20	21
23.07.2025	Цвітіння	0,81	0,12	14

На основі поєднання NDVI та MCARI вдалося визначити ділянки з різним рівнем стресу (табл. 7). Так, у нормі (ділянка 1) показники свідчили про здорові посіви, тоді як ділянки 2 і 3 демонстрували ознаки

дефіциту азоту та ураження хворобами відповідно. Це доводить діагностичний потенціал спектральних індексів для своєчасного виявлення проблемних зон.

7. Фітосанітарний стан за результатами спектрального аналізу

Ділянка	NDVI	MCARI	Ознаки стресу	Ймовірна причина
1	0,82	0,34	Норма	Здоровий посів
2	0,65	0,22	Знижений хлорофіл	Дефіцит азоту, пошкодження попелицею
3	0,49	0,16	Осередковий стрес	Ураження хворобами
4	0,72	0,30	Легка неоднорідність	Нерівномірне вологозабезпечення

Порівняння зон знижених значень індексів із результатами наземного моніторингу дозволило виявити: ураження рослин мікозами, осередки пошкодження попелицями, зони дефіциту азоту.

Відзначимо, що завдяки моніторингу вдалося простежити розвиток проблемних зон, зокрема: розширення площ з ознаками фітостресу на 18 % у період між фазами кущіння та викидання волоті; часткове

відновлення індексів після локального внесення добрив та/або захисних заходів.

Отже, застосування дистанційного моніторингу на основі мультиспектральних даних є ефективним інструментом оцінки фітосанітарного стану посівів сорго зернового, що дозволяє:

- своєчасно виявляти зони ризику (рис. 1);
- зменшити витрати на наземне обстеження;
- підвищити точність прийняття агрономічних рішень.

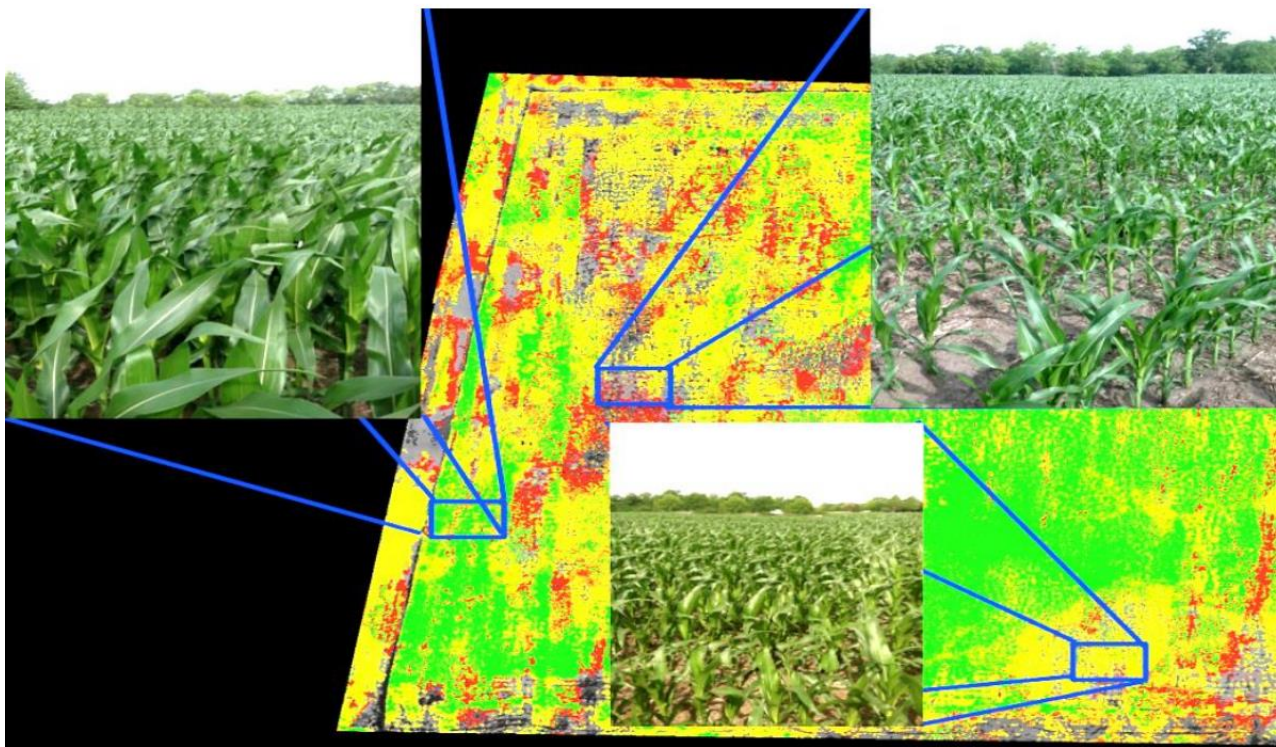


Рис. 1. Візуалізація NDVI-карти посівів сорго зернового: розподіл фітосанітарних ризиків

Ефективний моніторинг стану сільськогосподарських культур вимагає поєднання різних джерел інформації та технологій дистанційного зондування (рис. 2). Запропонована модель інтеграції супутникових даних дистанційного зондування та інформації, отриманої з безпілотних літальних апаратів, відображає багаторівневий підхід до оцінки фітосанітарного стану агроценозів сорго зернового. Схема передбачає поєднання глобального рівня спостережень (супутникові платформи, зокрема Sentinel-2, Landsat, PlanetScope), які забезпечують регулярний моніторинг на

великих площах, із локальним рівнем (БПЛА з мультиспектральними, тепловими та RGB-камерами), що дозволяє деталізувати виявлені аномальні ділянки.

На першому етапі здійснюється збір багоспектральної інформації, яка трансформується у вегетаційні індекси (NDVI, NDWI, MCARI, RENDVI тощо). Їх аналіз забезпечує первинне картування зон потенційного ризику. Наступний етап включає верифікацію даних шляхом поєднання дистанційних спостережень з результатами наземних обстежень (ground-truth даних), що підвищує вірогідність оцінок.

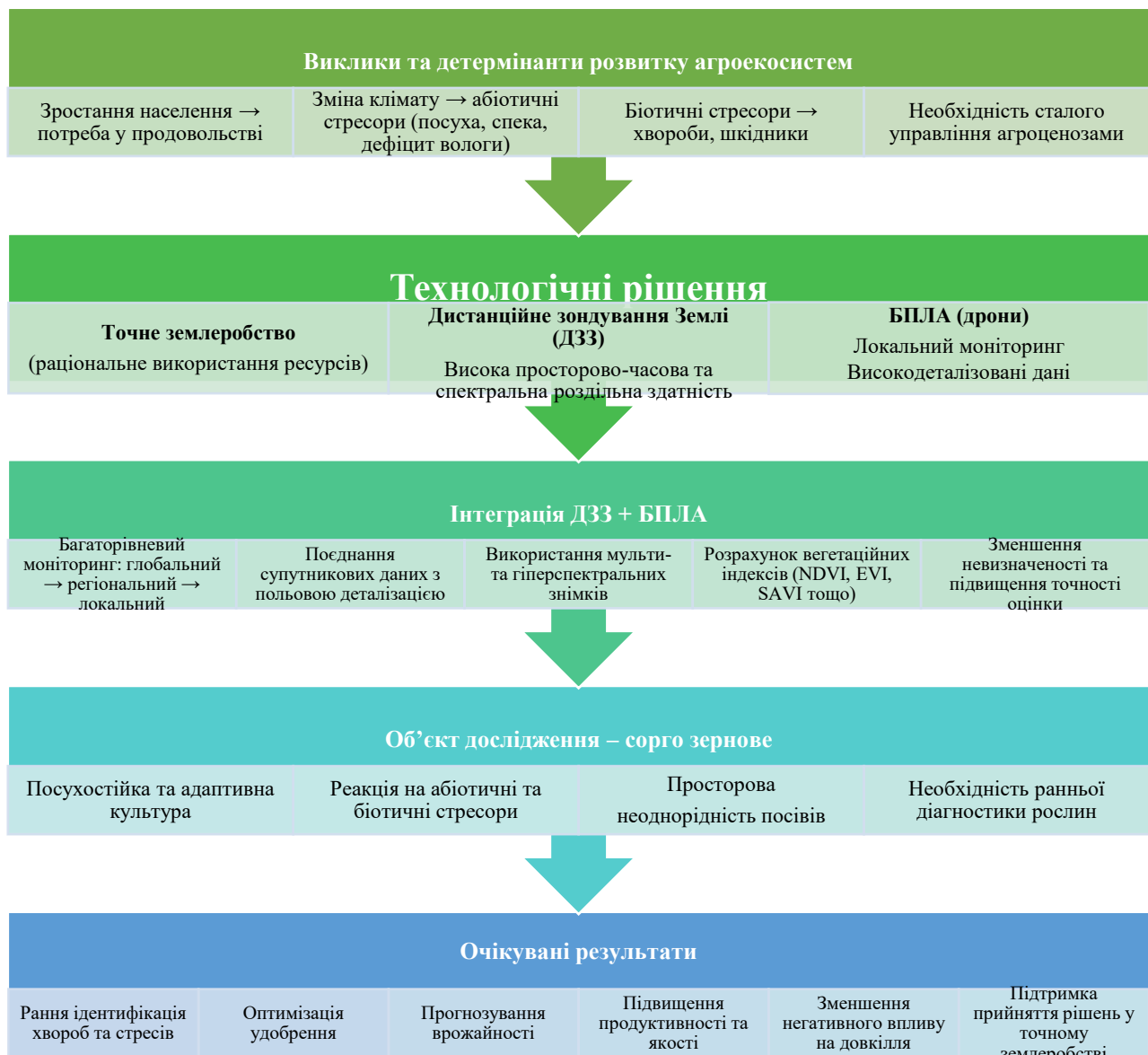


Рис. 2. Концептуальна модель використання технологій дистанційного зондування та БПЛА для оцінки фітосанітарного стану фітоценозів сорго зернового

У моделі передбачено зворотний зв'язок між рівнями спостережень: супутникові дані задають загальну картину просторової неоднорідності, тоді як БПЛА уточнюють діагностику на рівні окремих ділянок. Завдяки такій інтеграції забезпечується комплексна оцінка проявів абіотичних (посуха, дефіцит поживних речовин) та біотичних (ураження хворобами, пошкодження шкідниками) стресів.

Таким чином, концептуальна модель (рис. 2) виступає інструментом формування системи адаптивного фітосанітарного моніторингу, що дозволяє своєчасно

ідентифікувати проблемні зони, підвищує точність прийняття агрономічних рішень та створює підґрунтя для зменшення антропогенного навантаження на агроєкосистеми.

Висновки. Проведені дослідження довели ефективність застосування технологій дистанційного зондування Землі у поєднанні з даними БПЛА для оцінки фітосанітарного стану агроценозів сорго зернового. Використання супутникових платформ (Sentinel-2, Landsat, PlanetScope) забезпечує регулярний моніторинг великих площ та створює основу для розрахунку ключових вегетаційних індексів. Дані

БПЛА, оснащених мультиспектральними, тепловими та RGB-сенсорами, дозволяють деталізувати локальні прояви абіотичних і біотичних стресів, доповнюючи супутникову інформацію. Результати багаторічних спостережень (2022–2025 рр.) показали високу чутливість NDVI, NDWI, MCARI та RENDVI до змін у стані сорго, що підтверджує їх діагностичний потенціал. Інтеграція дистанційних методів із наземними вимірюваннями забезпечує вірогідність отриманих результатів та

Список використаної літератури

1. Билим О. І. Супутникові методи дослідження Землі. Львів : Видавництво ЛНУ ім. І. Франка, 2020. 238 с.
2. Бутенко Є. В. Геоінформаційне забезпечення моніторингу агроландшафтів. *Вісник геодезії та картографії*. 2023. № 2. С. 25–31.
3. Гнатюк М. І. Застосування ГІС-технологій у землекористуванні. *Науковий вісник*. 2022. № 3. С. 21–27.
4. Гудзь С. П., Яцишина А. С. Геодезичне забезпечення моніторингу земель: теорія і практика. Київ : Ліра-К, 2020. 198 с.
5. Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування / С. О. Довгий та ін. К. : Інститут обдарованої дитини НАПН України. 2019. 316 с. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/geography/map-technology/\[sensing\]\[handbook\]\[2019\]_osnovy_dystantsiynoho_zonduvannya_zemli_istoriya_ta_praktychne_zastosuvannya.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/geography/map-technology/[sensing][handbook][2019]_osnovy_dystantsiynoho_zonduvannya_zemli_istoriya_ta_praktychne_zastosuvannya.pdf).
6. Столяр С. Г. Особливості застосування інформаційних технологій при моніторингу шкідливих організмів сорго зернового в Поліссі України. *Сучасні тенденції розвитку галузі землеробства: проблеми та шляхи їх вирішення* : збірник тез доповідей III Міжнар. наук.-практ. конф. (Житомир, 8–9 черв. 2023 р.). Житомир, 2023. С. 106–110.
7. Столяр С., Трембіцька О. Моніторинг стану посівів сорго звичайного двокольорового з використанням дистанційного зондування землі. *Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток території Землі: наслідки та шляхи вирішення* : матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 12 черв. 2025 р.). Херсон, 2025. С. 171–175.
8. Chaloner T. M., Gurr S. J., Bebbler D. P. Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 2021. Vol. 11. P. 710–715. DOI: 10.1038/s41558-021-01104-8.
9. Detecting Sorghum Plant and Head Features from Multispectral UAV Imagery / Y. Zhao et al.

створює умови для формування системи адаптивного моніторингу. Запропонована концептуальна модель дає можливість своєчасно виявляти осередки фітостресу, оптимізувати застосування добрив і засобів захисту рослин. Таким чином, поєднання супутникових і безпілотних технологій створює наукове підґрунтя для розвитку точного землеробства та підвищення стійкості агроєкосистем сорго зернового в умовах кліматичних змін.

References

1. Bylym O. I. Satellite methods of Earth exploration. Lviv : Vydavnytstvo LNU im. I. Franka, 2020. 238 p.
2. Butenko Ye. V. Geoinformation support for monitoring agricultural landscapes. *Visnyk heodezii ta kartohrafii*. 2023. № 2. P. 25–31.
3. Hnatiuk M. I. Application of GIS technologies in land use. *Naukovyi visnyk*. 2022. No. 3. P. 21–27.
4. Hudz S. P., Yatsyshyna A. S. Geodetic support for land monitoring: theory and practice. Kyiv : Lira-K, 2020. 198 p.
5. Fundamentals of Earth Remote Sensing: History and Practical Applications / S. O. Dovhyi et al. K. : Instytut obdarovanoi dytyny NAPN Ukrainy. 2019. 316 p. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/geography/map-technology/\[sensing\]\[handbook\]\[2019\]_osnovy_dystantsiynoho_zonduvannya_zemli_istoriya_ta_praktychne_zastosuvannya.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/geography/map-technology/[sensing][handbook][2019]_osnovy_dystantsiynoho_zonduvannya_zemli_istoriya_ta_praktychne_zastosuvannya.pdf).
6. Stoliar S. H. Features of the application of information technologies in monitoring harmful organisms of grain sorghum in Polissia, Ukraine. *Modern trends in the development of agriculture: problems and ways to solve them* : zbirnyk tez dopovidei III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Zhytomyr, 8–9 cherv. 2023 r.). Zhytomyr, 2023. P. 106–110.
7. Stoliar S., Trembitska O. Monitoring the condition of bicolor common sorghum crops using remote sensing of the earth. The impact of climate change on the spatial development of the Earth's territories: consequences and solutions : materialy VII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Kherson, 12 cherv. 2025 r.). Kherson, 2025. P. 171–175.
8. Chaloner T. M., Gurr S. J., Bebbler D. P. Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 2021. Vol. 11. P. 710–715. DOI: 10.1038/s41558-021-01104-8.
9. Detecting Sorghum Plant and Head Features from Multispectral UAV Imagery / Y. Zhao et al. *Plant Phenomics*, 2021. 9874650. <https://doi.org/10.34133/2021/9874650>.
10. Estimation of sorghum seedling number from

Plant Phenomics, 2021. 9874650. <https://doi.org/10.34133/2021/9874650>.

10. Estimation of sorghum seedling number from drone image based on support vector machine and YOLO algorithms / H. Chen et al. *Front. Plant Sci.* 2024. Vol. 15. P. 1399872. DOI: 10.3389/fpls.2024.1399872.

11. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation / W. J. Frampton et al. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2013. Vol. 82. P. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>.

12. Mapping soil moisture with the Optical TRapezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations / E. Babaeian et al. *Remote sensing of environment*. 2018. Vol. 211. P. 425–440. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S03442571830186X>.

13. Nigussie Z. The effect of climate change on soil health: a review. *International journal of energy and environmental science*. 2024. . Vol. 9, No 3. P. 52–58. URL: <https://doi.org/10.11648/j.ijees.20240903.11>.

14. Novel machine learning framework for high-resolution sorghum biomass estimation using multi-temporal UAV imagery / E. Tunca et al. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2025. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06498-y>.

15. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach / S. K. Seelan et al. *Remote Sens. Environ.* 2003. Vol. 88. P. 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.007>.

16. Remote Sensing Applications in Agriculture / Ya. Verma et al. *Recent Trends in Agriculture*. 2024. Vol. 13. P. 159–180. https://www.researchgate.net/publication/382276464_Remote_Sensing_Applications_in_Agriculture.

17. Stoliar S., Kliuchevych M. Sorghum diseases in Polissia of Ukraine. *Sciences of Europe*. 2022. Vol. 90 (1). P. 3–6.

18. Uniting remote sensing, crop modelling and economics for agricultural risk management / E. Benami et al. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021. Vol. 2 (2). P. 140–159. <https://www.nature.com/articles/s43017-020-00122-y>.

19. Unmanned aerial systems-based remote sensing for monitoring sorghum growth and development / S. Shafian et al. *PLoS ONE*. 13 (5): e0196605. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196605>.

20. Uav-based sorghum growth monitoring: a comparative analysis of lidar and photogrammetry / M. Maimaitjiang et al. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. Vol. V-3-2020. P. 489–496. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-489-2020>.

drone image based on support vector machine and YOLO algorithms / H. Chen et al. *Front. Plant Sci.* 2024. Vol. 15. P. 1399872. DOI: 10.3389/fpls.2024.1399872.

11. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation / W. J. Frampton et al. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2013. Vol. 82. P. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>.

12. Mapping soil moisture with the Optical TRapezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations / E. Babaeian et al. *Remote sensing of environment*. 2018. Vol. 211. P. 425–440. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S03442571830186X>.

13. Nigussie Z. The effect of climate change on soil health: a review. *International journal of energy and environmental science*. 2024. Vol. 9, No 3. P. 52–58. URL: <https://doi.org/10.11648/j.ijees.20240903.11>.

14. Novel machine learning framework for high-resolution sorghum biomass estimation using multi-temporal UAV imagery / E. Tunca et al. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2025. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06498-y>.

15. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach / S. K. Seelan et al. *Remote Sens. Environ.* 2003. Vol. 88. P. 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.007>.

16. Remote Sensing Applications in Agriculture / Ya. Verma et al. *Recent Trends in Agriculture*. 2024. Vol. 13. P. 159–180. https://www.researchgate.net/publication/382276464_Remote_Sensing_Applications_in_Agriculture.

17. Stoliar S., Kliuchevych M. Sorghum diseases in Polissia of Ukraine. *Sciences of Europe*. 2022. Vol. 90 (1). P. 3–6.

18. Uniting remote sensing, crop modelling and economics for agricultural risk management / E. Benami et al. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021. Vol. 2 (2). P. 140–159. <https://www.nature.com/articles/s43017-020-00122-y>.

19. Unmanned aerial systems-based remote sensing for monitoring sorghum growth and development / S. Shafian et al. *PLoS ONE*. 13 (5): e0196605. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196605>.

20. Uav-based sorghum growth monitoring: a comparative analysis of lidar and photogrammetry / M. Maimaitjiang et al. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. Vol. V-3-2020. P. 489–496. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-489-2020>.