

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Агробіологічний факультет

ПОГОДЖЕНО  
Декан агробіологічного факультету

\_\_\_\_\_ Віталій КОВАЛЕНКО  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри агрохімії та якості  
продукції рослинництва ім. О. І. Душечкіна

\_\_\_\_\_ Дмитро ЛІТВІНОВ  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

з теми: Оптимізація системи удобрення кукурудзи на основі даних  
дистанційного зондування

Спеціальність 201 Агрономія

Освітня програма «Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві»

Орієнтація освітньої програми      Освітньо-професійна програма

**Гарант освітньої програми**

Академік НААН, доктор  
сільськогосподарських наук, професор \_\_\_\_\_ Анатолій БИКІН

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

Кандидат сільськогосподарських наук,  
доцент \_\_\_\_\_ Наталія ПАСІЧНИК

**Виконав**

\_\_\_\_\_ Максим ПЕТРЕНКО

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Агробіологічний документ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агрохімії та якості  
продукції рослинництва ім. О. І. Душечкіна

\_\_\_\_\_ Дмитро ЛІТВІНОВ

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

**ПЕТРЕНКУ Максиму Миколайовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 201 - Агрономія

Освітня програма «Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві»

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **Оптимізація системи удобрення кукурудзи на основі даних дистанційного зондування**

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" вересня 2025 р. №1978"С"

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

1. Літературні наукові й науково-публіцистичні дані за темою.
2. Дані дистанційного супутникового моніторингу агрофітоценозу, де будуть проведені дослідження, з описом та аналізом.
3. Результати польових і аналітичних досліджень згідно програми.
4. Результати обліку врожаю, економічного обґрунтування.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Агрохімічні та фізико-агрохімічні властивості ґрунту, що визначають ефективність засвоєння елементів живлення кукурудзою
2. Показники дистанційного зондування, найбільш інформативні для діагностики загального фізіологічного стану посівів кукурудзи?
3. Як просторово відрізняється інтенсивність росту та розвитку рослин на полі, і як ця неоднорідність впливає на потребу в добривах?
4. Обмеження та ризики методів дистанційного зондування під час роботи з кукурудзою

Перелік графічного матеріалу: графіки залежностей (за результатами досліджень)

Дата видачі завдання " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Наталія ПАСІЧНИК  
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Максим ПЕТРЕНКО  
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота включає вступ, 4 розділи, висновки, додатках. У роботі наведено 12 таблиць, 15 рисунків, у т.ч. графіків, 68 використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складає 66 сторінок.

В розділі 1 наведений короткий огляд літературних даних за темою дослідження, а саме дані про застосування супутникового моніторингу, методи й досвід прогнозування врожайності за використання ДЗЗ (даних дистанційного зондування Землі), характеристика досліджуваної культури. В розділі 2 описані умови проведення дослідження: територія, ґрунтово-кліматичні умови господарства, методика проведення дослідження. В розділі 3 описані проведені дослідження, з порівняльною характеристикою й описом спектральних ознак агрофітоценозу, біометричних, фенологічних, а також урожайних. В розділі 4 наведені дані економічного обґрунтування вирощування кукурудзи.

Завданням роботи було перевірити можливість прогнозувати врожайність кукурудзи за даними дистанційного супутникового моніторингу, із застосуванням NDVI та GNDVI.

Ключові слова: кукурудза, дистанційний моніторинг, вегетаційний індекс, спектральні дослідження, врожайність.

## Зміст

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ І МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ КУКУРУДЗИ (огляд літературних джерел)	
1.1. Оцінювання продуктивності культур на основі дистанційного зондування	12
1.2 Спектральні методи дослідження у прогнозуванні врожайності кукурудзи	15
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА, МІСЦЕ Й УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1. Обґрунтування методики	22
2.2. Місце проведення досліджень. Опис дослідного поля	
2.2.1 Інформація про господарство	23
2.2.2. Погодно-кліматичні умови території господарства	23
2.3. Ґрунти господарства	26
РОЗДІЛ 3. СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ Й УРОЖАЙНІСТЬ ФІТОЦЕНОЗІВ КУКУРУДЗИ	
3.1. Дані супутникового моніторингу агрофітоценозів кукурудзи	29
3.2. Дослідження різних рівнів фосфорного живлення кукурудзи за допомогою спектральних даних	32
3.3. Прогнозування врожайності кукурудзи на основі супутникових знімків	39
3.4. Фенологічний моніторинг і біометрична оцінка посівів кукурудзи	44
3.5. Урожай, структура та якість	45
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ	49
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54
ДОДАТКИ	60

## ВСТУП

Дистанційний моніторинг почав розвиватися ще у 1960-х роках, коли люди навчилися запускати супутники на орбіту Землі. Але відкрити доступ до супутникових даних для широкого користування вдалося лише наприкінці 1990-х – на початку 2000-х років. Відтоді ці технології активно вдосконалюються і стають корисними для різних сфер науки та виробництва.

У сільському господарстві дистанційний моніторинг допомагає швидко оглядати великі площі, виявляти проблемні ділянки на полях і зони, де рослини ростуть нерівномірно. Для цього використовують спектральні або лідарні дослідження. Раніше запускали супутники переважно для військових, пізніше – для метеорологічних чи наукових цілей, а сьогодні створюють спеціальні аграрні супутники. Вони мають мультиспектральні камери, які «бачать» ті діапазони світла, що найкраще відображають стан рослин. Водночас, більшість таких супутників надають свої дані лише за оплату [1, с. 12-24].

Є також безкоштовні програми, які дають змогу отримувати супутникові знімки. Це американська програма Landsat, що вже має восьму та дев'яту місії, і європейська програма Sentinel, у якій працюють кілька типів супутників з відкритим доступом до даних. Завдяки цим програмам аграрії можуть безкоштовно використовувати супутникові дані у своїй роботі та впроваджувати елементи точного землеробства.

Окрім супутників, дистанційний моніторинг проводять також за допомогою безпілотників (БПЛА) або літаків. Зазначені методи забезпечують більш точні результати, проте вони дорожчі, ніж супутникове спостереження [1, с. 37-61].

Кукурудза (*Zea mays L.*) залишається однією з найважливіших і найпоширеніших зернових культур світу. Кукурудза по праву здобула серед українських аграріїв почесне звання «цариці полів». Вона є не лише важливою високорентабельною культурою, що забезпечує стабільний прибуток господарствам, а й виконує стратегічну роль у формуванні ефективної

сівозміни. Завдяки своєму біологічному потенціалу кукурудза сприяє покращенню структури ґрунту, накопиченню органічної маси та підвищенню родючості, що робить її ключовим елементом у сучасних системах землеробства.

Сьогодні фермери мають доступ до широкої лінійки високопродуктивних гібридів, що дозволяє підібрати варіант саме той, що найкраще відповідатиме і кліматичним умовам, і рівню забезпечення вологою, технології конкретного господарства. Однак, найперспективніший генетичний потенціал навіть не реалізується без грамотної системи живлення.

Кукурудза займає провідні позиції у структурі рослинництва України та заслужено відома серед аграріїв як «цариця полів». Вона є високоприбутковою культурою, що забезпечує вагомий економічний внесок у сільське господарство, а також бере участь у формуванні ефективної сівозміни, позитивно впливаючи на родючість і структуру ґрунту (Інститут зернових культур НААН України, 2022) [2, 8-12]. Різноманітність сучасних гібридів кукурудзи дозволяє агровиробникам обирати найбільш адаптовані до певних умов вирощування варіанти, що дає можливість реалізувати генетичний потенціал рослин навіть за змінних кліматичних факторів (FAO, 2021) [3]. Максимальна ж реалізація біологічного потенціалу культури можлива лише за умови правильно підібраної системи живлення, яка враховує потреби рослини на різних стадіях, етапах росту та розвитку.

Кукурудза відноситься, як зазначено вище, до культур із високою потребою в елементах, особливо в азоті, фосфорі та калії, що зумовлено її інтенсивним ростом і високими показниками продуктивності (Baligar et al., 2001). Споживання елементів живлення змінюється залежно від фази розвитку, і критичними є періоди формування кореневої системи, закладання генеративних органів і наливу зерна. Нестача макро- та мікроелементів у ці фази негативно відбивається на врожайності та якості зерна, знижує ефективність засвоєння азоту та впливає на кінцеві економічні результати виробництва (Ciampitti & Vyn, 2013 ; Ritchie et al., 1993) [4, 48-52; 5]. Відтак,

стратегічно продумане, правильно збалансоване мінеральне живлення, адаптоване до ґрунтово-кліматичних умов та потреб культури, є необхідною умовою для отримання стабільно високого врожаю та реалізації її продуктивного потенціалу [6, 928].

Багато дрібних фермерів стикаються з труднощами у різних країнах під час визначення виду та кількості добрив, необхідних для підвищення урожайності. Зазвичай вони спираються на власний досвід або загальні рекомендації місцевих агрономів. Такі поради часто є узагальненими - вони розробляються для цілих регіонів чи країн і не враховують відмінності між окремими полями або навіть між ділянками одного поля.

Одним із сучасних шляхів підвищення ефективності удобрення є упровадження змінної норми внесення добрив, що дає змогу формувати рекомендації для конкретної ділянки поля. Основу такого підходу становлять теорії повернення поживних речовин, принцип сукупної дії факторів, закону мінімуму Лібіха, а також спадної віддачі від добрив. Використовуються й методики удобрення, засновані на аналізі ґрунту з урахуванням запланованої урожайності.

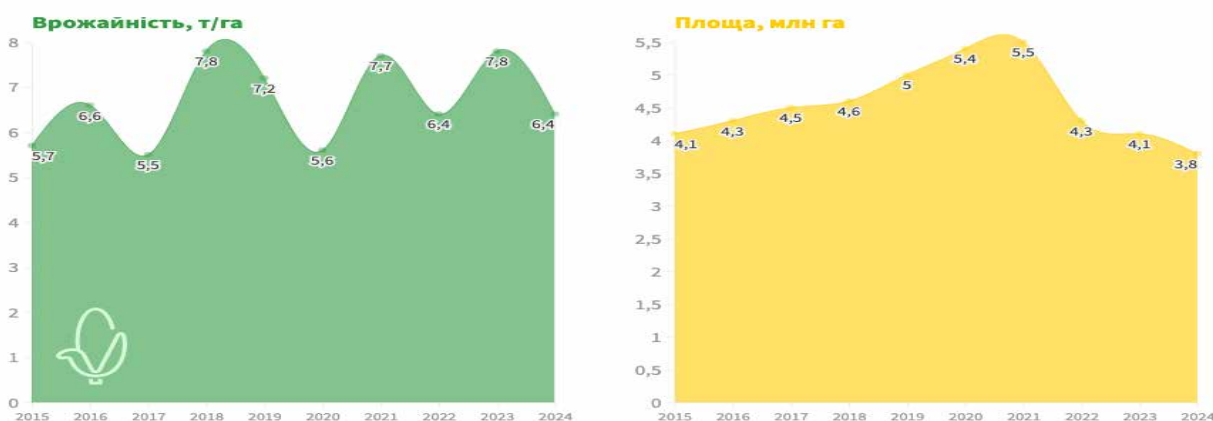
Сучасні моделі росту культур – такі як WOFOST, DSSAT і APSIM - дозволяють визначати потребу рослин у добривах на ключових етапах розвитку. Проте через складність застосування та необхідність великої кількості вхідних даних ці моделі поки що мало використовуються у практиці фермерів та органів управління.

Традиційні методи визначення норм удобрення. На практиці більшість господарств визначає норми добрив, виходячи з цільової урожайності та вмісту поживних речовин (N, P, K) у ґрунті. Для цього проводять відбір ґрунтових і рослинних зразків та виконують лабораторні аналізи. Недоліки цього підходу: складність отримання репрезентативних зразків; висока вартість досліджень; тривалість обробки результатів; обмежене використання на великих площах. Тому актуальним є пошук оперативних, недеструктивних і точних методів оцінки потреб у добривах, особливо для ярої кукурудзи.

Найпоширенішим у господарствах залишається підхід, коли норми добрив визначаються за цільовим рівнем урожайності та вмістом основних елементів живлення (N, P, K) у ґрунті. Для цього проводять відбір зразків і лабораторні аналізи, проте цей метод має обмеження: він трудомісткий, дорогий і потребує багато часу, що ускладнює його застосування на великих площах. Відтак, сьогодні актуальним є пошук швидких, неструктуривних і точних методів оцінювання потреби у добривах, особливо для системи вирощування ярої кукурудзи.

Через інтенсивне землеробство добрива, зазвичай, вносять кілька разів протягом вегетаційного періоду. Для ярої кукурудзи основне удобрення проводять під час сівби, а підживлення – у фазах кушення (V6), формування волоті (R1) та іноді у фазі 12-го листка (V12). Конкретні стратегії підживлення залежать від регіону, кліматичних умов, трудових ресурсів і фінансових можливостей господарства. Це створює певну невизначеність у виборі оптимальної системи удобрення і потребує вдосконалення відповідно до потреб рослин.

#### Кукурудза: врожайність та площі 2015-2024 рр.



Джерело: Держстат України - Створено за допомогою Flourish: Станом на 10.12.2024

 SUPERAGRONOM.COM  
Головний сайт для агрономів

Рис. 1. Структура посівних площ основних культур, 2017-2024 рр. (джерело: Держстат України, оформлення <https://superagronom.com/articles>)

Серед макроелементів найбільше значення має нітроген (N), який безпосередньо впливає на урожайність. Однак спільне застосування азоту, фосфору (P) та калію (K) сприяє кращому росту рослин і підвищенню

ефективності засвоєння поживних речовин, що в результаті забезпечує вищий урожай зерна.

Кукурудза як для України, так і для світового аграрного сектору, залишається стратегічно важливою культурою. Тому надзвичайно важливо контролювати стан посівів і завчасно оцінювати потенційну врожайність, що дає змогу ефективно планувати логістику постачання зерна — від поля до переробних підприємств, складів, елеваторів чи портів [7]. Оскільки площі посівів кукурудзи є значними, традиційні методи спостереження стають малоефективними. У цьому контексті перспективним напрямом є використання інструментів дистанційного моніторингу, які дозволяють оперативно отримувати дані про стан рослин та виявляти проблемні ділянки полів .

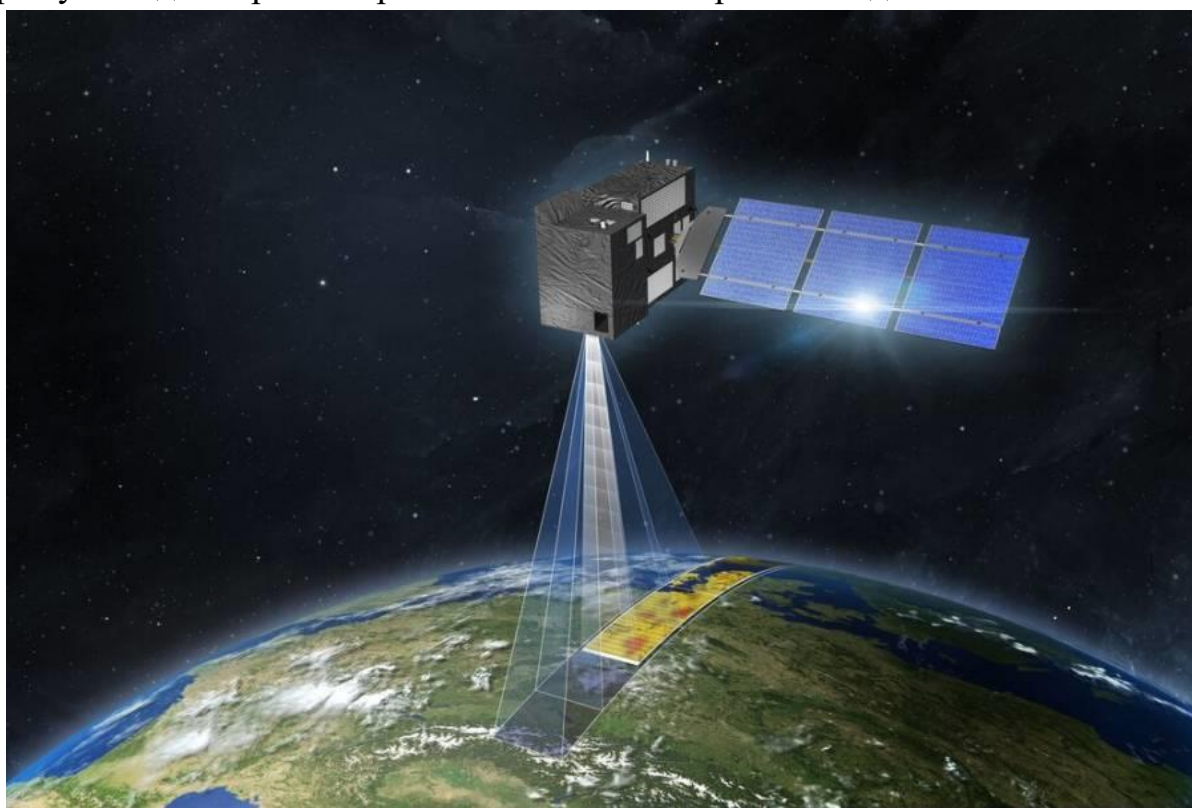


Рис. 2. Зображення супутникового зондування поверхні планети  
Джерело: <https://aggeek.net/>

Завдяки можливості спостерігати великі території з висоти 200–300 км над поверхнею Землі супутникові технології забезпечують швидке виявлення змін у посівах і дають змогу прогнозувати потенційну врожайність культур.

Метою дипломної роботи стала перевірка можливості прогнозування врожайності кукурудзи на зерно з використанням інструментів дистанційного моніторингу.

# РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ І МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ КУКУРУДЗИ

(огляд літературних джерел)

## 1.1. Оцінювання продуктивності культур на основі дистанційного зондування

Оцінювання продуктивності культур на основі дистанційного зондування ґрунтується на тому, що спектральні властивості рослин відображають їхній фізіологічний стан - інтенсивність фотосинтезу, вміст хлорофілу, біомасу, водне забезпечення та рівень живлення. Методи аналізу серій супутникових або безпілотних знімків у різних діапазонах (видимому, NIR, red-edge тощо) дозволяють визначати взаємозв'язок між спектральними показниками та майбутньою продуктивністю посівів. Доведено, що використання часових рядів спектральних індексів забезпечує більш точні прогнози врожайності порівняно з одноразовими спостереженнями [8; 9, 1559-1563].

Основні спектральні індекси для кукурудзи. NDVI застосовується для оцінювання розвитку листового апарату та біомаси на ранніх і середніх етапах росту. EVI забезпечує точніші результати для густих посівів та використовується, коли NDVI досягає насичення [10, 412]. Індекси red-edge (NDRE, хлорофільні коефіцієнти) особливо ефективні для контролю азотного стану рослин і відстеження їхнього розвитку на пізніх стадіях. SWIR-показники використовують для діагностики водного дефіциту та оцінки структурних змін рослинної тканини.

Спектральна специфіка кукурудзи. Кукурудза демонструє виражену фенологічну змінність спектральних параметрів: від низьких значень індексів після сходів до максимуму на фазі активної вегетації й поступового зниження під час дозрівання. Для цієї культури найбільш показові індекси, чутливі до азотного забезпечення та показників зеленості листків, оскільки вони тісно пов'язані з формуванням урожаю [11]. Щільність стояння рослин і просторові

неоднорідності можуть впливати на інтерпретацію даних, тому доцільно застосовувати декілька індексів одночасно, а для детальної діагностики - гіперспектральні дані або машинне навчання [12, 317-321].

Джерела інформації та технічні можливості. Сучасні супутникові місії (наприклад, Sentinel-2, Landsat) і комерційні сервіси високої роздільності забезпечують доступ до даних, придатних для оперативного моніторингу кукурудзи. Дрони з мульти- або гіперспектральними сенсорами дозволяють детально дослідити стан рослин на рівні поля й використовуються для калібрування супутникових моделей [1, 21-62; 13, 18-23].

Етапи моделювання врожайності. Попередня обробка знімків (корекція на атмосферні впливи, фільтрація хмарності). Розрахунок спектральних індексів і деривація фенологічних показників [14, 4-16]. Побудова моделей прогнозування (регресійні методи, ансамблеві алгоритми, нейронні мережі). Перевірка точності моделей за фактичними даними врожайності та польовими вимірюваннями.

Практичні аспекти застосування технології. Найкращих результатів досягають при поєднанні супутникової інформації з ґрунтовими аналізами, даними про сорти, строки сівби та агротехніку. Для високої точності важливо проводити калібрування моделей, враховувати особливості регіону та використовувати дані за кілька сезонів.

Потенційні труднощі. На якість прогнозів можуть впливати погодні умови (хмарність), просторове розділення знімків, неоднорідність ґрунтового фону та зміни технології вирощування. Для подолання цих обмежень застосовують спеціальні індекси, алгоритми очищення даних та багатосезонні моделі [12, 317-321; 15, 147-149].

### **Методи прогнозування врожайності кукурудзи на зерно**

Для оцінки та прогнозування врожайності сільськогосподарських культур сьогодні використовують три основні підходи:

Традиційний метод. Цей підхід базується на прямому обліку елементів структури врожаю та розрахунку потенційної продуктивності культури. Він передбачає визначення густоти стояння рослин на 1 га, кількості продуктивних органів (наприклад, кількості качанів у кукурудзи), кількості рядів зерен і зернин у ряду, а також маси 1000 зерен. Така методика забезпечує високу точність оцінки майбутнього врожаю, оскільки враховує фактичні морфологічні параметри рослин. Однак її основними недоліками є можливість застосування лише на завершальних етапах вегетації культури та значні часові витрати на проведення польових вимірювань і розрахунків (Al-Shammari et al., 2025) [16].

Біофізичні симуляційні моделі. Цей підхід передбачає прогнозування врожайності на основі математичних моделей, що відтворюють процеси росту та розвитку рослин. Для формування таких моделей необхідна розширена інформація щодо сорту культури, параметрів ґрунту, динаміки вологості, температурного режиму та інших агроекологічних показників. Попри високу точність, застосування моделі ускладнює потреба у значному обсязі вхідних даних та спеціалізованому обладнанні для їх отримання (Darra et al., 2023) [17, 1554-1560].

Емпіричний метод. Метод ґрунтується на аналізі даних дистанційного зондування та порівнянні спектральних і вегетаційних індексів (наприклад, NDVI, NDRE) із фактичними показниками урожайності минулих років. Це дозволяє формувати моделі прогнозування на основі накопичених даних. Основними перевагами підходу є оперативність, доступність супутникової інформації та можливість охоплення великих площ при мінімальних витратах. Крім того, цей підхід дає змогу швидко ідентифікувати проблемні ділянки поля та потенційні причини їх виникнення, що сприяє оптимізації витрат на агрохімічні та діагностичні заходи (Radočaj et al., 2025; Torres-Madronero et al., 2023) [18, 11].

## 1.2 Спектральні методи дослідження у прогнозуванні врожайності кукурудзи

У сучасних системах прогнозування врожайності кукурудзи найпоширенішим підходом є пошук статистичних залежностей між фактичними показниками урожайності попередніх років і значеннями вегетаційних індексів, отриманих із даних дистанційного моніторингу. Такі моделі можуть застосовуватися як на рівні середніх значень по полю, так і на рівні окремих пікселів – за умови наявності карт врожайності з комбайнів. Найчастіше використовують індекси NDVI, EVI та інші спектральні показники [19, 20].

Однак кукурудза є складною культурою для побудови чітких кореляційних моделей, оскільки формує значну кількість вегетативної маси. Це призводить до так званого "насичення індексів", коли вегетаційні індекси перестають коректно відображати додаткове наростання біомаси. Попри це обмеження, розробники агроіджитал-сервісів активно застосовують даний підхід, удосконалюючи моделі шляхом введення корекційних коефіцієнтів на кліматичні умови конкретного року, агротехнологічні параметри та забезпеченість ґрунту поживними речовинами. У результаті точність прогнозів може досягати похибки близько 15% за умови використання знімків із високою просторовою роздільністю [21, 346-353].

Практичне підтвердження ефективності емпіричних моделей щодо кукурудзи на зерно демонструють як закордонні, так і українські дослідження. Зокрема, одним з українських прикладів є наукові роботи, присвячені прогнозуванню урожайності кукурудзи цукрової на основі супутникових даних. Дослідження проводили на зрошуваних полях Білозерського району Херсонської області протягом двох років на темно-каштанових ґрунтах із використанням сортів та гібридів вітчизняної селекції [22]. Статистичний аналіз дозволив встановити достовірний зв'язок між рівнем урожайності товарних качанів кукурудзи цукрової та значенням індексу NDVI у фазу цвітіння волоті. Це дало змогу сформуванню емпіричну модель оцінки продуктивності культури:

чим вищим є середнє значення NDVI на період цвітіння, тим вищий прогнозований рівень урожайності. Відтак, дистанційний моніторинг, інтегрований із науковими методами математичного аналізу, служить ефективним інструментом прогнозування урожайності кукурудзи в умовах виробництва.

Таблиця 1.1

Урожайність кукурудзи цукрової залежно від середньозваженого показника NDVI посіву в фазу цвітіння

NDVI	Прогнозована врожайність кукурудзи цукрової, т/га		
	мінімальна	середня	максимальна
0,2-0,3	2,00	2,49	3,00
0,3-0,4	3,00	3,74	4,50
0,4-0,5	4,00	4,98	6,00
0,5-0,6	5,00	6,23	7,50
0,6-0,7	6,00	7,48	9,00
0,7-0,8	7,00	8,72	10,50
>0,8	>8,00	9,97-11,22	>13,50

Як автор статті зазначає, точність прогнозу 81,11 %. Це достатньо для методу прогнозування врожайності.

Kayad A. et al (2019) [23] використовували дані супутника Sentinel 2 і машинне навчання. Доведена можливість дослідження прогнозування врожайності кукурудзи з використанням індексу GNDVI для знімків у фазу R4-R6 (молочно-воскової та повної стиглості), що відповідає 80-89 BBCH.

За результатами дослідження Fieuzal R. et al (2017) [24, 14-20], оцінку врожайності кукурудзи здійснювали за варіантами чистих каналів, а також поєднання їх, і отримані були позитивні результати для прогнозування врожайності кукурудзи на зерно, зокрема для хвиль червоного діапазону.

Отже, науковими дослідженнями доведено можливість і доцільність прогнозування урожайності кукурудзи на зерно з використанням супутникового моніторингу можливе. Водночас, вчені наголошують на методичному забезпеченні таких робіт.

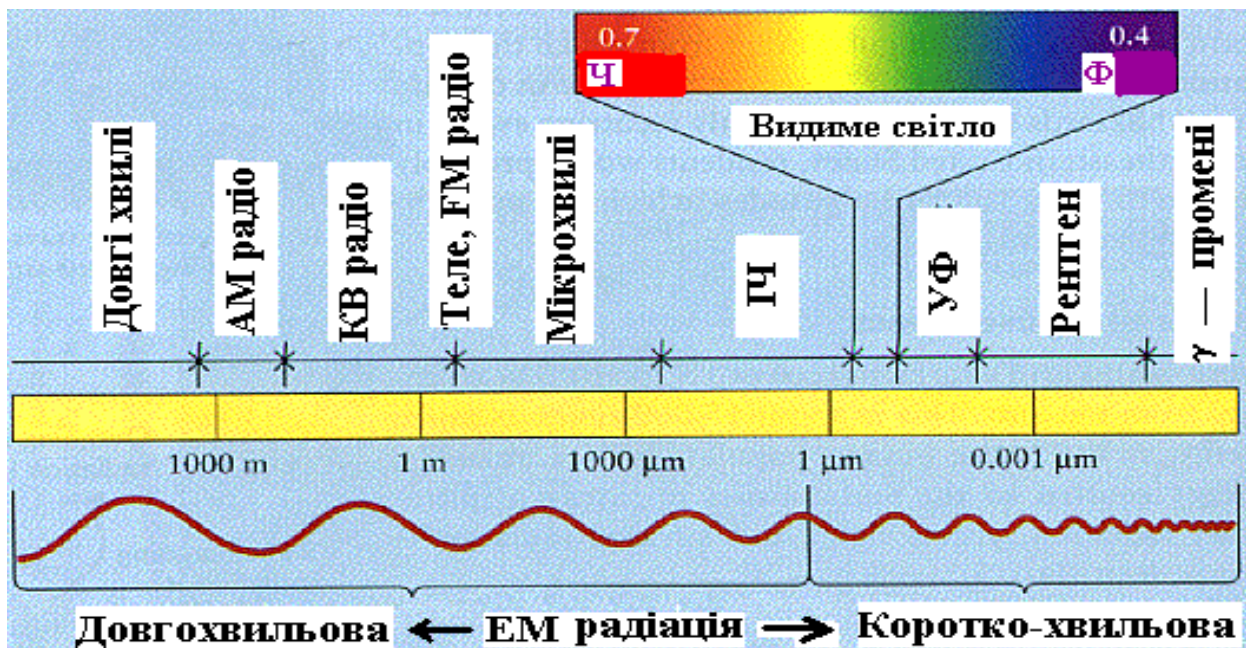
Під час використання супутникових даних для аграрного моніторингу важливо враховувати, що вихідною інформацією є багатоспектральні супутникові знімки. Кожен знімок формується за рахунок відбитого від поверхні Землі електромагнітного випромінювання, яке реєструють сенсори супутника в різних спектральних каналах та з різною просторовою роздільністю [25].

Спектральні діапазони спостереження. Сучасні супутникові сенсори здатні фіксувати випромінювання як у видимій частині спектра, так і у невидимих для людського ока діапазонах - ближньому інфрачервоному, короткохвильовому інфрачервоному тощо. Кожний об'єкт на поверхні Землі має власні спектральні характеристики і відбиває світло по-різному. Це дозволяє ідентифікувати типи поверхонь та оцінювати їхній стан за унікальними спектральними «підписами» [26; 27, 77-79].

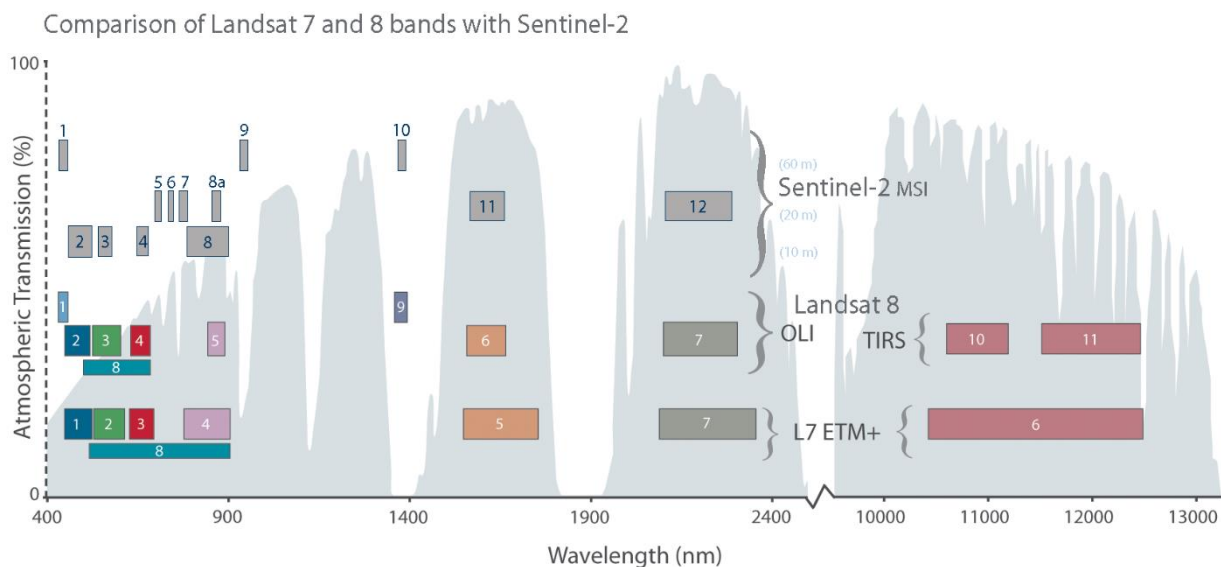
Діапазон видимого світла для людського ока становить приблизно 400–720 нм. Рослини відзначаються специфічними спектральними характеристиками: частину випромінювання вони поглинають (передусім у синьому та червоному спектрах), а частину - відбивають (особливо в ближньому інфрачервоному діапазоні). Саме на цій властивості базується дистанційний моніторинг рослинності. Аналіз різниці відбиття в певних діапазонах дозволяє обчислювати вегетаційні індекси, за допомогою яких здійснюється оцінка стану посівів та прогнозування їх урожайності [28, 2369–2391; 29, 114-118].

Доступні супутникові дані. Серед супутникових систем, що надають відкриті дані для моніторингу сільськогосподарських угідь, найбільш поширеними є серії Landsat 7–9 та Sentinel-2. Європейська космічна агенція (ESA) працює над родиною супутникових місій, що мають загальну назву Sentinels. Ці місії розробляються для програми Copernicus – найамбітнішої, як кажуть, програми зі спостережень за Земною кулею на сьогодні. Програма Copernicus надаватиме своєчасну, точну, доступну інформацію дистанційного зондування, яка допоможе робити кращі рішення

для управління навколишнім середовищем. Кожна з місій Sentinel несе спеціальні інструменти для спостережень: радарна місія для спостережень за поверхнею землі та океанів (Sentinel-1, Sentinel-6), мультиспектральна місія (Sentinel-2), іструменти для досліджень топографії поверхні океанів, температури та кольору поверхні землі та океанів (Sentinel-3), інструменти для досліджень атмосфери (Sentinel-4, Sentinel-5).



а)



б)

Рис. 1.1. Діапазони електромагнітного випромінювання:  
а) поділ довжин хвиль; б) канали Sentinel-2 та Landsat, NASA

Супутники Landsat забезпечують доступ до зображень у 11 спектральних каналах, супутники Sentinel-2 - у 12 каналах. Найбільш інформативними для агрономічного моніторингу є канали, що охоплюють видимий спектр (синій, зелений, червоний), ближній інфрачервоний діапазон (NIR) та короткохвильовий інфрачервоний (SWIR), оскільки саме вони найбільше корелюють зі станом рослинної біомаси, рівнем фотосинтетичної активності та вологістю рослин. Таблиця демонструє основні канали для спостереження за рослинністю, аналізу стану посівів.

Таблиця 1.2

## Спектральні канали супутників Landsat та Sentinel-2

Діапазон	Landsat 8–9 (OLI)	Sentinel-2	Спектральний діапазон (нм)	Призначення
Blue	Band 2	Band 2	~450–510	Оцінка води, впливу атмосфери, хлорофілу
Green	Band 3	Band 3	~530–590	Біофізичні параметри, здоров'я рослин
Red	Band 4	Band 4	~640–670	Хлорофіл, вегетація
Red Edge	—	Bands 5–7	~705–783	Висока чутливість до стану рослин, хлорофіл
NIR	Band 5	Band 8	~840–880	Біомаса, щільність рослинності
Narrow NIR	—	Band 8A	~865	Деталізоване виявлення рослин
SWIR1	Band 6	Band 11	~1570–1670	Вологість рослин та ґрунту
SWIR2	Band 7	Band 12	~2100–2300	Стрес, тип ґрунтів, пожежі
PAN	Band 8	—	~500–680	Панхроматика (висока роздільність)

Джерело: USGS [30], 2023; ESA, 2020 [31; 32])

Також є два дальніх інфрачервоних канали, із довжинами хвиль 10,3-11,3 мкм та 11,5-12,5 мкм. Цей канал для спостереження за зміною в температурах поверхні землі, що також використовуватись може як дані супутникового моніторингу [32].

Додатковим джерелом даних для супутникового моніторингу є цифрові моделі рельєфу (Digital Elevation Model, DEM), зокрема знімки, отримані місіями Copernicus та Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Такі моделі

формується на основі радарної інтерферометрії, що базується на вимірюванні часу повернення електромагнітного імпульсу після його відбиття від поверхні Землі. Отримані DEM-дані забезпечують можливість детального аналізу рельєфу території, визначення схилів, експозиції, зон акумуляції вологи та інших топографічних характеристик, які суттєво впливають на ріст і продуктивність сільськогосподарських культур. Застосування цих даних дозволяє приймати обґрунтовані технологічні рішення під час планування агротехнологічних операцій, зокрема розробки схем зрошення, планування диференційованого внесення добрив та вибору оптимальних маршрутів техніки (ESA, 2020; Farr & Kobrick, 2000) [31; 33].

Точність прогнозування значною мірою визначається фазою розвитку культури, у яку отримано супутникові знімки. Моделі, побудовані на ранніх етапах вегетації (травень–червень), зазвичай характеризуються більшою похибкою, тоді як у період інтенсивного росту та репродуктивних стадій (V10–VT–R) достовірність оцінок істотно підвищується. У наукових дослідженнях підкреслюється, що дані, отримані під час репродуктивних фаз — зокрема пікові значення сезонних індексів NDVI та показники red-edge у фазу цвітіння — демонструють найтісніший зв'язок із формуванням урожаю.

За польовими даними показники  $R^2$  зазвичай коливаються від приблизно 0.6 до понад 0.8 при використанні сезонних спектральних індексів у поєднанні з методами машинного навчання. На ширших територіальних рівнях (район/регіон) розкид значень більший — у межах 0.4–0.85, що залежить від якості супутникових даних, обсягу вибірки та долучення додаткових факторів, таких як погодні умови чи властивості ґрунтів. Гіперспектральні дані та більш складні ML-алгоритми часто забезпечують невелике, але стабільне поліпшення точності порівняно з моделями, заснованими лише на традиційних вегетаційних індексах.

Основні обмеження й типові проблеми включають хмарність і пропуски у серіях знімків, що частково вирішується застосуванням методів композитування (наприклад, MVC або max-NDVI), хоча певна втрата

інформації все одно можлива. Також складнощі спричинює невідповідність просторових масштабів між даними БПЛА та супутниковими матеріалами. Крім того, для якісної калібрації й перевірки моделей необхідні достовірні польові вимірювання (stop cuts, агрономічні дані). Окремо зазначають, що точність прогнозів може знижуватися через варіативність агротехнологій, сортових особливостей та строків сівби.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА, МІСЦЕ Й УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Обґрунтування методики

Останнє десятиріччя вегетаційні індекси (VIs) активно застосовують у високоточному фенотипуванні сільськогосподарських культур, із використанням супутників і безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Їх використовують для оцінювання площі листкової поверхні, вмісту хлорофілу й азоту в листках, а також для визначення біомаси та прогнозування врожайності (Gao et al., 2022) [34]. Особливо перспективними є вузькоспектральні індекси, сформовані на основі гіперспектральних даних, оскільки вони відзначаються вищою чутливістю порівняно зі стандартними широкосмуговими індексами щодо змін фізіологічного стану рослин (Zhang et al., 2021) [35].

Живлення рослин має прямий зв'язок із кількістю внесених добрив, а вегетаційні індекси можуть виступати індикаторами цього зв'язку, тобто відображати «міст» між рівнем удобрення та фізіологічним станом рослин (Teal et al., 2019) [36]. Відтак, використання VIs дає змогу оптимізувати систему рекомендацій щодо внесення добрив шляхом побудови багатоетапної стратегії підживлення, адаптованої до просторової неоднорідності посівів.

Наукові дослідження в Україні та за кордоном свідчать, що за наявності великої вибірки польових вимірювань співвідношення між нормами внесення добрив, запасом поживних речовин у рослинах і врожайністю може бути встановлено з високою точністю [37, 1125-1126]. Поєднання даних ДМ з БПЛА з наземними вимірюваннями дає змогу формувати просторово точні карти живлення, визначати потреби в удобренні та прогнозувати врожайність зернових культур із високою достовірністю. Технології БПЛА забезпечують неінвазивний, оперативний і економічно доцільний інструмент для моніторингу азотного статусу посівів та прогнозування врожайності кукурудзи (Sánchez et al., 2022) [38].

Метою проведених польових та дистанційних досліджень було:

оцінити реакцію врожайності кукурудзи на різні норми внесення комплексних добрив NPK;

визначити можливість прогнозування врожайності на основі вузькоспектральних індексів та встановити критичні значення індексів для прийняття рішення щодо підживлення;

встановити взаємозв'язки між спектральними індексами та нормами внесення добрив на ключових етапах органогенезу кукурудзи;

порівняти чутливість та прогностичну ефективність різних спектральних індексів у контексті прийняття рішень щодо внесення добрив.

Застосована багаторівнева система підживлення демонструє високий потенціал підвищення ефективності управління NPK-добривами й може бути масштабована для використання у регіонах інтенсивного вирощування кукурудзи.

## **2.2. Місце проведення досліджень. Опис дослідного поля**

### **2.2.1 Інформація про господарство**

ТОВ «Рапсодія» розташоване у Вінницькому районі Вінницької області. Основним напрямом діяльності є інтенсивне землекористування: приблизно 90 % сільськогосподарських угідь – рілля, що свідчить про спрямованість на максимальну продуктивність і прибутковість виробництва. Інші категорії угідь – пасовища, багаторічні насадження та допоміжні ділянки - складають лише близько 10 % загальної площі. Така структура землекористування дозволяє ефективно використати площі під зернові, бобові та технічні культури, забезпечуючи високий рівень врожайності та рентабельності виробництва.

### **2.2.2. Погодно-кліматичні умови території господарства**

ТОВ «Рапсодія» розташоване в межах лісостепової природно-кліматичної зони України, яка характеризується помірно-континентальним кліматом, із достатнім зволоженням і вираженою сезонністю. Кліматичні умови регіону загалом є сприятливими для розвитку землеробства, проте періодично

спостерігаються погодні фактори ризику. Зокрема, в червні та серпні можливі короткочасні посухи, що обумовлюють необхідність раціонального використання ґрунтової вологи, ретельного планування строків сівби та впровадження посухостійких сортів сільськогосподарських культур. Навесні інколи фіксуються поворотні заморозки, тоді як у зимові місяці нерідко спостерігаються відлиги, що може негативно впливати на перезимівлю озимих культур.



Рис. 2.1. Територія господарства на супутниковому знімку

Джерело: USGS , 2024

Середньорічна температура повітря за багаторічними метеорологічними спостереженнями становить близько  $+7,2$  °C, що практично відповідає показникам останніх років ( $+7,4$  °C у 2021 р.). Річна сума опадів коливається в межах 570–610 мм, з максимумом у червні–липні. Осінній період зазвичай характеризується теплим та переважно сухим режимом погоди (табл. 2.1, рис. 2.2). Середня температура найбільш теплого місяця (серпня) становить  $+20,3...+22,5$  °C, а найхолоднішого (січня) – від  $-6$  °C до  $-8$  °C. Відмічені екстремуми температур сягають  $+38$  °C та  $-34$  °C відповідно. Протягом року

опадів розподіляються відносно рівномірно: взимку переважає сніг, у теплий період - дощ.

Таблиця 2.1.

Розподіл температури повітря та сума опадів за місяцями  
(дані районної метеостанції)

Місяць	Середня $t^{\circ}$ (°C)	Опади (мм)	Середня вологість (%)
Січень	-5.8	31.4	≈ 85
Лютий	-4.1	31.1	≈ 80
Березень	0.5	28.9	—
Квітень	8.3	45.1	—
Травень	14.3	59.0	≈ 66
Червень	17.5	76.1	—
Липень	19.3	90.3	≈ 72
Серпень	18.5	72.6	—
Вересень	14.0	49.9	—
Жовтень	7.8	38.5	—
Листопад	2.1	41.2	—
Грудень	-2.8	36.1	≈ 88

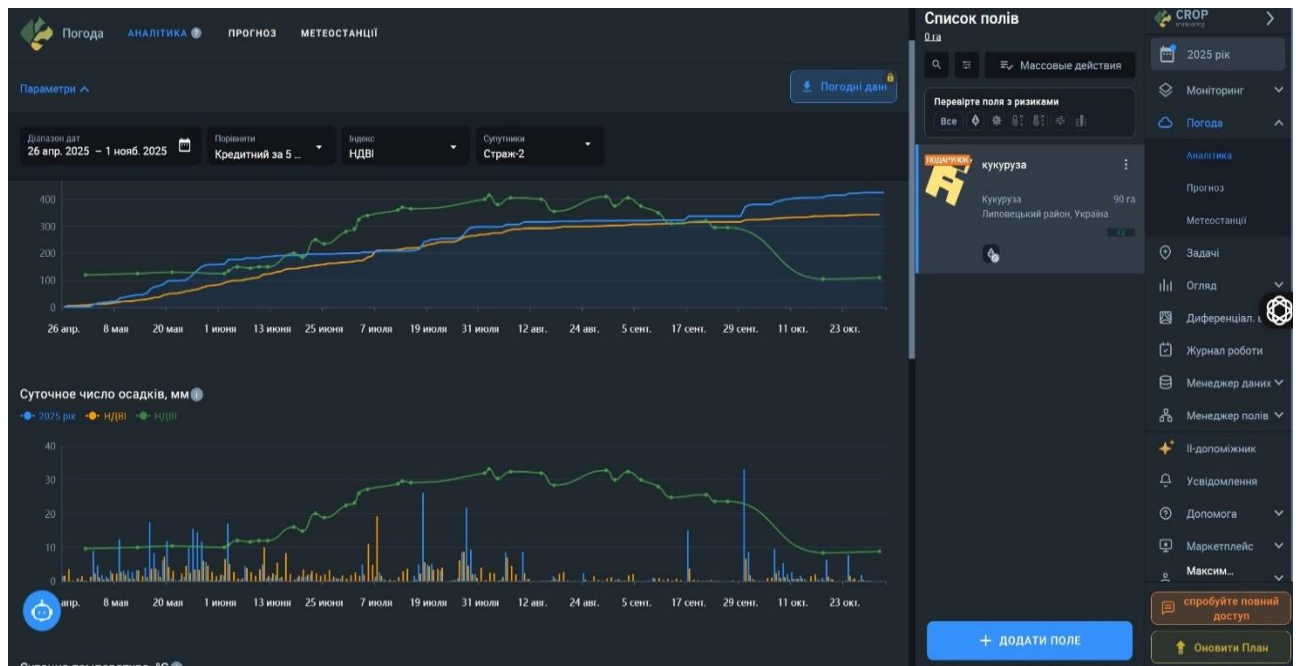


Рис. 2.2. Динаміка опадів на території досліджень

Джерело: Crop Monitoring, 2025

Сума активних температур становить 2480–2700 °С. Початок весняно-польових робіт припадає на квітень, коли середньодобова температура перевищує +5 °С, а найінтенсивніша фаза вегетації зазвичай настає у травні, коли температура стабільно тримається вище +15 °С.

Клімат регіону є сприятливим для вирощування основних культур помірної зони, а також для садівництва, овочівництва та виноградарства. Водночас, можливі небажані погодні явища, такі як зливи з грозами, град, тривалі посушливі періоди, суховії, пилові бурі, льодяна кірка та ожеледь. З огляду на ці умови, агротехнології мають враховувати ризики вітрової та водної ерозії, забезпечувати ефективне використання ґрунтової вологи та адаптивні технології вирощування культур.

### **2.3. Ґрунти господарства**

Земельні угіддя ТОВ «Рапсодія» знаходяться в зоні поширення високопродуктивних чорноземів, що формують основу агроландшафтного потенціалу регіону та створюють сприятливі умови для ведення інтенсивного рослинництва. Домінуючим типом ґрунтового покриву є чорноземи типові середньогумусні, які належать до найбільш цінних у світовому землеробстві завдяки високому природному рівню родючості. Ці ґрунти характеризуються значним вмістом гумусу, доброю агрегатною структурою, оптимальним водно-повітряним режимом, високою ємністю катіонного обміну та здатністю до тривалого утримання елементів, що обумовлює високий продуктивний потенціал та універсальність у виборі культур.

За гранулометричним складом більшість ґрунтів належать до середньосуглинкових. Така текстура сприяє накопиченню вологи у кореневмісному шарі, забезпечує рівномірний розвиток кореневої системи й оптимізує процеси доступності макро- та мікроелементів. Кислотність ґрунтового розчину варіює від слабокислої до нейтральної, що є оптимальним показником для більшості сільськогосподарських культур. На окремих ділянках виявлено тенденцію до підкислення внаслідок тривалого використання

мінеральних добрив, тому у господарстві систематично проводять заходи з хімічної меліорації, зокрема вапнування, для підтримання оптимального рН та стабілізації родючості.

Агрохімічний аналіз свідчить про необхідність регулярного поповнення запасів доступних форм елементів живлення. В окремих полях зафіксований знижений вміст рухомих сполук фосфору, що вимагає коригування системи удобрення з акцентом на фосфорні добрива. Крім того, важливим є моніторинг забезпеченості калієм і кальцієм, оскільки вони відіграють ключову роль у формуванні продуктивності та стійкості посівів до посухи, температурних коливань і фізіологічних стресів.

У структурі ґрунтового покриву переважають два типи ґрунтів – темно-сірі опідзолені та чорноземи опідзолені, які разом займають близько 90 % площ. Темно-сірі опідзолені ґрунти характеризуються достатньою потужністю гумусового горизонту, підвищеним умістом пилюватих часток і мулу. На схилових ділянках можливий розвиток ерозійних процесів, що спричиняє переміщення дрібнодисперсних частинок та зменшення запасів поживних речовин на верхніх елементах рельєфу. Їх кислотність – слабокисла або близька до нейтральної, середній вміст гумусу складає 2,0–4,0%, переважає фульватно-гуматний тип гумусу, що забезпечує добру в цілому продуктивність більшості культур. Чорноземи опідзолені відзначаються вищою природною родючістю порівняно з темно-сірими опідзоленими, що зумовлено більшим умістом гумусу (3,5–5,0 %), кращими фізико-хімічними властивостями та підвищеними запасами азоту в орному шарі.

Отже, ґрунтово-агрохімічні умови території господарства гарантують значний потенціал урожайності польових культур, зокрема кукурудзи на зерно. раціональної системи удобрення, застосування заходів проти деградаційних процесів та адаптивних технологій вирощування з урахуванням кліматичних умов і сучасних принципів сталого землеробства. Агрохімічні характеристики ґрунтів полів господарства наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

## Агрохімічні показники ґрунтів полів

№ поля	pH <sub>(КСІ)</sub> ґрунту	Гідролітична кислотність, мг-екв. / 100 г	Вміст гумусу, % (за методом Тюріна-Конової)	Вміст лужногідролізованого азоту, мг/100 г	Вміст P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г (за Чиріковим)	Вміст K <sub>2</sub> O, мг/100 г (за Чиріковим)	Вміст СаО, мг.екв./100 г ґрунту	Вміст MgO, мг.екв./100 г ґрунту	Вміст MnO, мг/100 г	Вміст В, мг/100г г
2	5,5	1,82	3,01	17,6	11,2	11,0	17,5	3,2	50	2,8
3	6,2	1,06	3,43	156	14,1	12,4	20,0	3,7	38	2,8
4	5,5	1,46	2,6	100	10,9	9,6	12,5	3,5	44	1,9
5	5	2,25	2,59	117	8,2	9,4	15,1	3,6	41	1,7
6	5,4	1,52	2,8	134	9,2	9,8	14,9	3	36	2,7
7	6,1	1,5	2,4	103	118	95	12,1	2,5	42	1,9
8	5,3	1,23	2,7	148	79	115	16,1	3,7	45	2,5

Кислотність ґрунтів, окрім п'ятого поля, є слабокислою і нейтральною, що й дозволяє багато різних культур вирощувати. Згідно показників, уміст калію, бору є підвищеним і високим, манган у середніх межах на всіх полях сівозміни. Поле 5 є середньокислим, з підвищеним рівнем реакції гідролітичної кислотності, що вказує на потребу в меліоративних заходах, а саме внесенні вапнякових матеріалів для нейтралізації, що тривало сприятиме підвищенню врожайності культур.

## РОЗДІЛ 3. СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ Й УРОЖАЙНІСТЬ ФІТОЦЕНОЗІВ КУКУРУДЗИ

### 3.1. Дані супутникового моніторингу агрофітоценозів кукурудзи

Сучасний розвиток цифрових технологій у сільському господарстві визначає ключову роль геоінформаційних систем (ГІС) та технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у контролі стану посівів і прогнозуванні майбутньої врожайності. ГІС-платформи забезпечують можливість комплексного збирання, систематизації, аналізу та картографічного відображення просторових і часових даних, що сприяє підвищенню точності агрономічних рішень та удосконаленню системи управління полем (Schmidt et al., 2022; Li et al., 2021). Застосування методів ДЗЗ дає змогу отримувати достовірну інформацію про біофізичні характеристики рослинного покриву, зокрема показники вегетаційних індексів, фотосинтетичну активність культур і структурні зміни посівів у часі (Drusch et al., 2012; ESA, 2023).

Вказані цифрові інструменти є особливо важливими у вирощуванні зернових культур, зокрема кукурудзи, де точність визначення стану рослин та прогнозування біологічної продуктивності має вирішальне значення для ефективного планування виробничих процесів, оптимізації внесення ресурсів та удосконалення систем живлення. З огляду на це, у даній роботі для моделювання врожайності кукурудзи були використані рішення на основі відкритих ГІС-платформ та супутникових даних.

У рамках дослідження для просторового аналізу та картографування було застосовано програмне забезпечення QGIS, яке є однією з найбільш поширених платформ у сфері геоінформаційних технологій. Його популярність обумовлена відкритим вихідним кодом, відсутністю ліцензійних обмежень і широким спектром доступних функціональних модулів (QGIS Development Team, 2023). Розвиток програмного забезпечення здійснюється міжнародною спільнотою,

серед розробників якої є представники України, що підкреслює його значення для наукових та освітніх проєктів у нашій державі.

Відкритість QGIS забезпечує можливість створення різноманітних картографічних продуктів – тематичних карт, картограм, моделей просторового розподілу показників урожайності і посівної продуктивності. Саме тому це програмне забезпечення було обрано як базовий інструмент для реалізації поставленого завдання.

Для прогнозування врожайності та оцінки стану посівів кукурудзи використано супутникові знімки місії Sentinel-2 Європейського космічного агентства. Дані цієї місії доступні у відкритому доступі, що робить їх особливо цінними для аграрних досліджень та впровадження точного землеробства (ESA Copernicus Programme, 2015). Одним із каналів доступу до супутникових знімків було обрано веб-платформу EO Browser, яка дозволяє оперативно завантажувати та обробляти дані.



Рис. 3.1. Фото супутника Sentinel 2 на орбіті Землі  
(Джерело: відкриті Інтернет-джерела)

Sentinel-2 надає мультиспектральні зображення з просторовою роздільною здатністю до 10 м (рис. 3.1), що є найвищим показником серед безкоштовних супутникових

продуктів для сільського господарства. Крім того, дані проходять атмосферну та геометричну корекцію вже на серверному рівні, що мінімізує необхідність додаткової попередньої обробки. Важливою перевагою є висока повторюваність зйомки (2–3 дні в зоні дослідження), що забезпечує своєчасне

оновлення даних і підвищує точність моніторингу динаміки розвитку рослин (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Поле, яке буде засіяне кукурудзою (24.11.2024 р.)

Для прогнозування урожайності кукурудзи на зерно було обрано два спектральні канали і два вегетаційні індекси, які найбільш ефективно відображають стан посівів та фізіологічні процеси рослин:

А) Червоний спектр. На супутниковій платформі Sentinel-2 червоний діапазон відповідає 4-му каналу з довжиною хвилі 665 нм. Даний спектр активно поглинається хлорофілом листової маси, тому його використовують для фіксації інтенсивності росту та розвитку рослинності. Низькі значення відбиття відповідають більшій кількості зеленої біомаси, що свідчить про кращий стан рослин.

Б) Зелений спектр. Зелений діапазон реєструється за допомогою 3-го каналу Sentinel-2 на довжині хвилі 560 нм. На відміну від червоного спектру, зелена світловола переважно відбивається листям, що дозволяє оцінювати ступінь відбиття світла і, відповідно, стан рослинної поверхні. Хоча зелений

спектр частково протилежний червоному за фізичними характеристиками, він не є його аналогом і може виступати як самостійний показник при моделюванні урожайності.

В) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Нормалізований різницевий індекс вегетації — один із найбільш поширених у дистанційному моніторингу. Розраховується як відношення різниці до суми значень ближнього інфрачервоного (NIR) та червоного спектральних каналів. NDVI забезпечує чітке виділення зон з різною щільністю та активністю зеленої біомаси, що робить його ключовим показником при оцінці стану посівів.

Г) GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index). GNDVI є модифікацією NDVI, де замість червоного використовується зелений спектральний діапазон. Цей індекс чутливіший до вмісту хлорофілу та рівня водозабезпечення рослин, що дозволяє точніше оцінювати фізіологічний стан посівів. Завдяки відсутності жорсткої кореляції між поглинанням червоного і зеленого діапазонів, GNDVI був включений до переліку показників для прогнозування урожайності кукурудзи на зерно.

### **3.2. Дослідження різних рівнів фосфорного живлення кукурудзи за допомогою спектральних даних**

Результати досліджень вітчизняних і зарубіжних учених свідчать, що за наявності значного масиву польових даних можливо з високою точністю визначати оптимальні норми мінерального живлення шляхом встановлення зв'язків між дозами внесення добрив, забезпеченістю рослин елементами живлення та рівнем урожайності. Використання детальних польових вимірювань у поєднанні з даними дистанційного моніторингу, зокрема отриманими з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), створює основу для формування статистично обґрунтованих рекомендацій щодо точного удобрення.

У сучасних дослідженнях широке застосування отримали індекси вегетації, які використовуються для фенотипування рослин за допомогою

БПЛА та інших інструментів дистанційного зондування. Такі індекси дозволяють оцінювати площу листкової поверхні, вміст хлорофілу та азоту, біомасу та потенційний рівень урожайності. Останніми роками особливу увагу приділяють вузькосмуговим індексам, сформованим на основі гіперспектральних зображень, оскільки вони характеризуються вищою чутливістю до фізіологічних змін у рослинах порівняно зі стандартними широкосмуговими індексами. Враховуючи, що стан мінерального живлення рослин безпосередньо залежить від норм внесення добрив, застосування вегетаційних індексів як інструмента оцінки потреби у підживленні є перспективним підходом. Це дозволяє використовувати індекси як проміжну ланку між фактично внесеними добривами та реакцією рослин, створюючи передумови для формування адаптивних систем рекомендацій з удобрення.

Кукурудза належить до культур із високою здатністю засвоювати поживні речовини завдяки добре розвиненій кореневій системі, що проникає у значний обсяг ґрунту. Порівняно з іншими зерновими, кукурудза споживає більше елементів живлення на формування одиниці врожаю, а за величиною винесення елементів наближається до технічних культур — цукрових буряків і картоплі. Для формування 6–7 т зерна або 50–70 т/га зеленої маси вона потребує близько 150–180 кг азоту, 50–60 кг фосфору та 150–200 кг калію з 1 га. Інтенсивні гібриди витрачають у середньому 18–25 кг азоту, 8–10 кг фосфору та 16–24 кг калію на 1 т зерна разом із відповідною вегетативною масою [8–10].

Поглинання елементів живлення протягом вегетації є нерівномірним. Найактивніше засвоєння азоту триває від появи сходів до воскової стиглості, причому критичним періодом є фаза появи волоті та цвітіння. Фосфор надходить у рослини більш рівномірно, однак найвища його потреба спостерігається на ранніх етапах розвитку, особливо за умов холодної весни. Калій необхідний від початку росту, але його максимальне накопичення пов'язане з формуванням і наливом зерна, оскільки кукурудза за показниками якості частково споріднена з олійними культурами [2, 6, 8].

За дефіциту фосфору в рослинах уповільнюються ключові фізіолого-біохімічні процеси: зменшується синтез білків та ферментів, що негативно впливає на інтенсивність біосинтезу, обмін речовин і швидкість фотосинтезу. Фосфор також є важливою складовою хромосом, які забезпечують збереження та передачу спадкової інформації. За його нестачі в рослинному організмі скорочується кількість також запасних речовин, що, відповідно, відбивається на якості продукції.

Вміст елемента у різних органах рослин перебуває у динамічній рівновазі й змінюється зі зростанням та віком культури. Забезпечення рослини цим елементом оцінюють не лише за його концентрацією, а й за величиною виносу — кількістю азоту, необхідною для формування одиниці врожаю. Протягом вегетації загальний винос елементу зростає, проте відносний його вміст у багатьох органах зменшується через «розбавлення» елемента в клітинах, що інтенсивно збільшуються в об'ємі.

Особливо важливими для живлення є фази 5–7 листків та 9–10 листків – викидання волотей. У першому випадку формуються майбутні репродуктивні органи, і рослини потребують передусім фосфору для розвитку кореневої системи та азоту для наростання надземної маси. Другий період супроводжується інтенсивним накопиченням урожаю, тому рослини активно засвоюють основні елементи живлення: до 50 % загальної потреби в азоті й фосфорі та до 70 % - у калії. Тривалість цього відрізка вегетації становить у середньому 17–20 діб (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Винос головних елементів живлення кукурудзою,  
% від максимального [11]

Фаза росту і розвитку	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
4-5 листків	0,3	0,2	0,2
9-10 листків	4,2	2,5	4,4
Поява волоті	44,0	33,0	69,0
Цвітіння	61,0	61,0	79,0
Стиглість			
молочна	89,0	88,0	95,0
воскова	100,0	94,0	100,0
повна	93,0	100,0	82,0

За даними науково-дослідних установ, максимальний винос азоту і калію для рослин кукурудзи на зерно відзначено у фазу воскової стиглості, тоді як споживання фосфору продовжується до настання повної стиглості. Таким чином, кукурудза має високу відзивчивість на азотні добрива, рівень забезпеченості ґрунтів азотом має прямий вплив на накопичення його в органах рослин. Але залежно від біологічних особливостей гібридів показники вмісту азоту у рослинах досліду також змінювався. Система живлення культури – норма і строк удобрення – мали значний вплив на вміст азоту в рослинах. Відзначено, що у варіанті без добрив показники були меншими в усі досліджувані періоди і для всіх гібридів.

У дослідженнях було поставлено наступні завдання. Дослідити реакцію урожайності кукурудзи на різні рівні застосування комплексних NPK-добрив. Виконати прогнозування урожайності за допомогою вузькосмугових індексів рослинності та визначити порогові значення показників, за яких доцільно проводити підживлення. Встановити кореляційні зв'язки між значеннями вегетаційних індексів і дозами внесених добрив у різні фази росту кукурудзи. Провести порівняльний аналіз індексів щодо їх чутливості та ефективності для визначення потреби в добривах у критичні періоди формування урожайності.

Запропонована модель багаторівневого управління живленням кукурудзи може підвищити точність застосування NPK-добрив і має потенціал для масштабного впровадження в агровиробництві регіонів, де кукурудза є стратегічною культурою. В межах поля було закладено дослідні ділянки вивчення трьох рівнів фосфорного - 0, 60, 120, 180 і 240 кг N/га, п'ять рівнів фосфору - 0,25, 50, 75 і 100 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га, та п'ять рівнів калію - 0, 30, 60, 90 і 120 кг K<sub>2</sub>O/га. Усі варіанти удобрення повторювались чотири рази (табл. 3.2). Внесення NPK-добрив здійснювали одноразово перед сівбою.

Таблиця 3.2

## Дозування внесення добрив у досліді

Варіант удобрення	N-добриво (кг N/га)	P-добриво (кг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /га)	K-добриво (кг K <sub>2</sub> O/га)
N <sub>100</sub> P <sub>0</sub> K <sub>90</sub>	100	0	90
N <sub>100</sub> P <sub>50</sub> K <sub>90</sub>	100	50	90
N <sub>100</sub> P <sub>75</sub> K <sub>90</sub>	100	75	90
N <sub>100</sub> P <sub>100</sub> K <sub>90</sub>	100	100	90

**Вибір вузькосмугових індексів рослинності.** Оскільки живлення і врожайність кукурудзи взаємопов'язані з різними біофізичними параметрами, такими як активність пігментів, структура агрофітоценозу та фізіологія, було обрано у дослідженні 10 вузькосмугових індексів рослинності, які корелюють з цими параметрами. Враховувались різні формули для обчислення індексів (нормалізовані, на основі відношень тощо). Їхні характеристики наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

## Рівняння для обчислення вегетаційних індексів

Індекс	Формула
NIR/G (Near infrared/Green)	R780 / R550
SR (Simple ratio)	R780 / R670
RVI (Ratio vegetation index)	R790 / R670
CCI (Canopy chlorophyll index)	R720 / R700
CIgreen (Green chlorophyll index)	R780 / R550
NDVI (Normalized difference vegetation index)	$(R850 - R675) / (R850 + R675)$
mND705 (Red-edge normalized difference vegetation index)	$(R750 - R705) / (R750 + R705 - 2R445)$
VARI (Visible atmospherically resistant index)	$(R550 - R660) / (R550 + R660 - R470)$

Щоб визначити кількість добрив для підживлення кукурудзи у фазах кущення та викидання волоті, необхідні кілька параметрів:

- оптимальна кількість внесених добрив;
- порогові значення вузькосмугових індексів рослинності, за якими визначається потреба у підживленні;
- кількість азоту, внесеного у фазах кущення та викидання волоті, для досягнення рівнів LNC.

**Реакція врожайності на внесення NPK-добрив.** Для визначення максимальної врожайності за внесення NPK добрив врожайність кукурудзи розглядали як залежну змінну, а кількість P – як незалежні. Для опису цього зв'язку побудована лінійна регресійна модель. Далі кількість внесеного нітрогену розглядали як фіксовану змінну, а взаємозв'язок між врожайністю й кількістю фосфору моделювали за допомогою регресійного аналізу та відображали у вигляді побудованої контурної карти.

**Оцінка чутливості вузькосмугових вегетаційних індексів до норм внесення азотних добрив.** З метою встановлення реакції рослин на різні норми живлення було досліджено взаємозв'язок між показниками вузькосмугових вегетаційних індексів (VIs) та рівнем внесення азотних добрив. Враховуючи наявні залежності між врожайністю кукурудзи та значеннями VIs, а також між врожайністю та кількістю внесеного азотфосфору, модель формувалася із залученням урожайності як проміжної змінної.

Для опису цих залежностей була застосована поліноміальна регресійна модель, що дало змогу прогнозувати рівень фосфорного удобрення на всій площі досліджуваного поля. Оцінювання точності моделі здійснювали на основі коефіцієнта детермінації ( $R^2$ ), який характеризує ступінь відповідності модельованих значень фактичним даним.

На фінальному етапі роботи проведено аналіз чутливості, спрямований на визначення варіації значень вузькосмугових індексів за різних доз внесення азотних добрив. Такий підхід дозволив оцінити ефективність використання гіперспектральних VIs як індикаторів азотного живлення та потенціал їх

практичного застосування у системах точного землеробства для оперативного коригування норм удобрення.

Чутливість обчислювали за формулою:

$$Sensitivity = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VI_i - VI_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{i-1})^2}}$$

VI - значення вузькосмугового VIs у наборі варіантів удобрення

N - кількість внесеного фосфору,

i - номер вибірки, поділеної відповідно до того самого інтервалу.

Зв'язок між урожайністю кукурудзи та кількістю внесених добрив NPK було визначено за допомогою покрокової регресійної моделі. Модель показала хорошу здатність передбачати врожайність, з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,805$  та середньоквадратичною помилкою  $RMSE = 1227,80$  кг/га, що свідчить про надійність оцінки реакції врожайності на кількість добрив NPK.

$$Yield = 44.06 \times N + 1.851 \times P + 6.739 \times K + 2641.94$$

$$(R^2=0.805, n = 168)$$

Середні значення вмісту нітрогену в листках (LNC) у фазах кущіння та цвітіння, урожайність зерна та відносна врожайність (RY) для кожного варіанту удобрення наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Вміст нітрогену в рослинах кукурудзи гібриду Mayflower (Lidea) залежно від застосування добрив, %, 2025 р.

Варіант досліджу	4-5 листків	Викидання волотей			Повна стиглість	
		листки	стебла	початки	листки	стебла
N <sub>100</sub> P <sub>0</sub> K <sub>90</sub>	3,01	2,46	1,34	2,17	1,51	0,61
N <sub>100</sub> P <sub>50</sub> K <sub>90</sub>	3,64	3,03	2,03	2,84	2,23	1,09
N <sub>100</sub> P <sub>75</sub> K <sub>90</sub>	4,21	3,44	2,30	3,05	2,55	1,55
N <sub>100</sub> P <sub>100</sub> K <sub>90</sub>	4,71	2,77	1,77	2,66	1,93	1,14

Для норми  $N = 100$  кг/га урожайність кукурудзи підвищувалася зі збільшенням кількості фосфорних добрив (P0, P25, P50, P75). Тому врожайність зерна була розглянута як залежна змінна, а кількість внесених фосфорних і калійних добрив - як незалежні змінні. Регресійний аналіз проводився при нормі внесення азоту 180 кг/га, і на його основі була визначена залежність врожайності від кількостей фосфору та калію. Результати представлені у вигляді контурної карти (рис. 3.3).

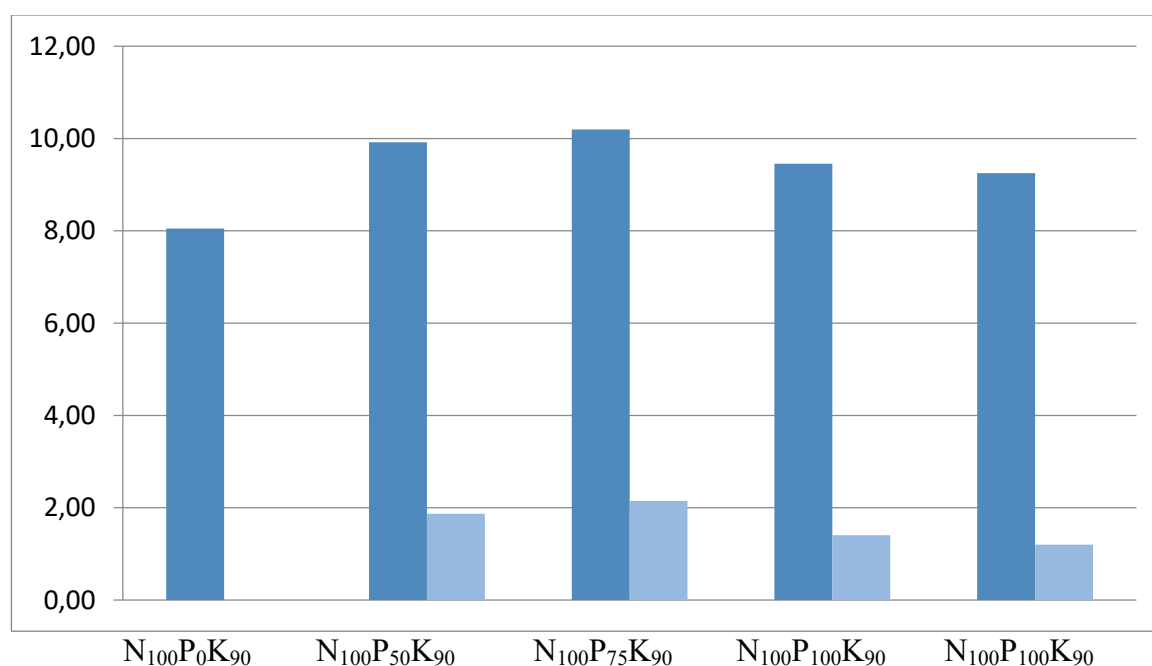


Рис. 3.3. Урожайність зерна кукурудзи залежно від удобрення, т/га

Як видно з рисунка, оптимальна норма фосфорного добрива - 26–100 кг/га. Розрахунки показали, що за стабільної норми внесення нітрогену, яка визначає очікуваний урожай, кількість фосфорних і калійних добрив можна регулювати в певному діапазоні, а не застосовувати фіксовані дози.

### 3.3. Прогнозування врожайності кукурудзи на основі супутникових знімків

Зелений нормалізований диференційований вегетаційний індекс (GNDVI) належить до групи спектральних індексів, що базуються на комбінації ближнього інфрачервоного (NIR) та зеленого (Green) діапазонів електромагнітного спектра. На відміну від класичного індексу NDVI, у якому використовується червоний спектральний канал, GNDVI застосовує зелений

канал, що забезпечує підвищену чутливість до вмісту хлорофілу, фотосинтетичної активності та показників азотного живлення рослин (Gitelson et al., 1996). Основною перевагою GNDVI є його здатність оцінювати фізіологічний стан вегетаційної маси, зокрема рівень вологості та концентрації азоту в рослинній тканині. Таким чином, показник може служити індикатором функціональної активності листкового апарату та виявляти зони потенційного стресу рослин, що особливо важливо при моделюванні біопродуктивності агроценозів та прогнозуванні врожайності сільськогосподарських культур, зокрема кукурудзи (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Супутникові знімки агрофітоценозу кукурудзи  
(квітень-червень 2025 р.)

Розрахунок індексу здійснюється за формулою:

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

де NIR - відбивальна здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні, Green - відбивальна здатність у зеленій області спектра.

Зменшення значень GNDVI може свідчити про зниження біохімічної активності рослин, зокрема пригнічення хлорофілу, дефіцит азоту або розвиток інших стресових факторів, що безпосередньо впливають на формування майбутньої врожайності. Отже, використання GNDVI є доцільним інструментом у системах дистанційного моніторингу посівів та точного

землеробства для ранньої діагностики стану культур та оптимізації заходів управління удобренням [18]. Аналіз отриманих даних представлений у графіках (рис. 3.5-3.8).

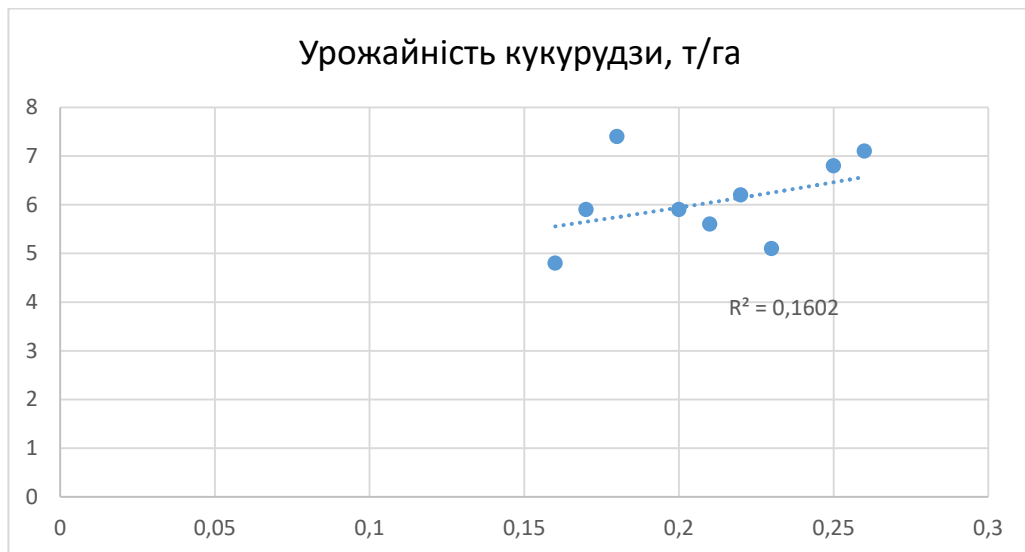


Рис. 3.5. Залежність врожайності від середнього значення індексу GNDVI (7-8 листків), т/га

Графік свідчить що показники несистематично розкидані і не мають тісних залежностей з урожайністю кукурудзи, що не дає підстав для прогнозування врожайності культури. Водночас, в згідно тренду графіка та його формулою, прогнозований рівень врожаю становитиме 7,3 т/га.

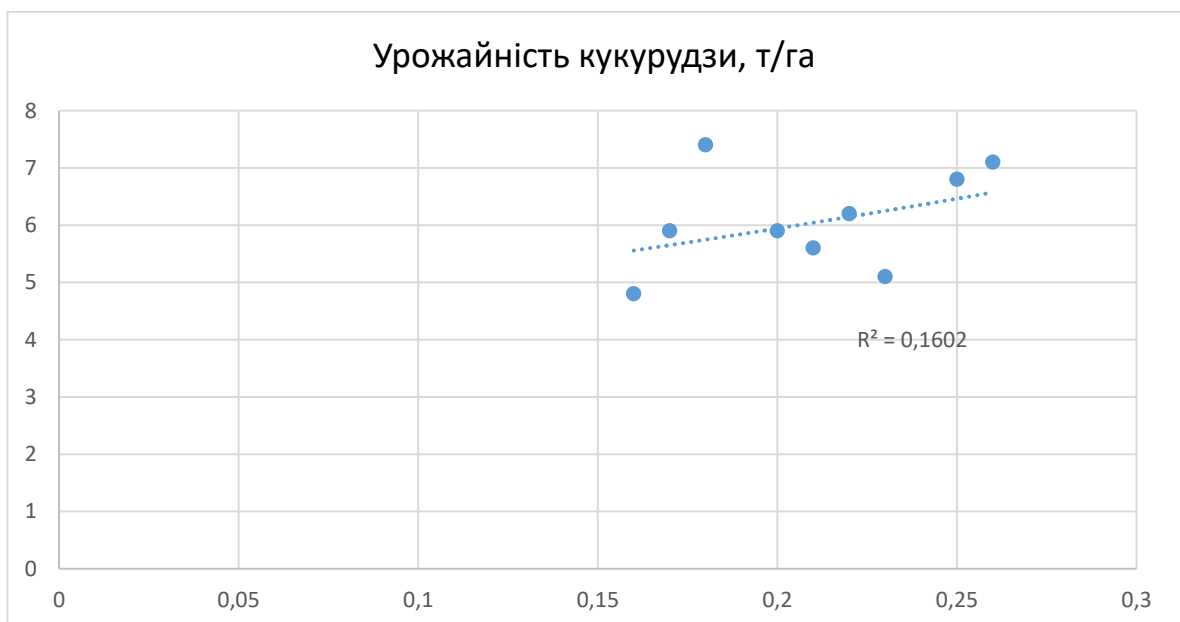


Рис. 3.6. Залежність врожайності від середнього значення індексу GNDVI (викидання волоті), т/га

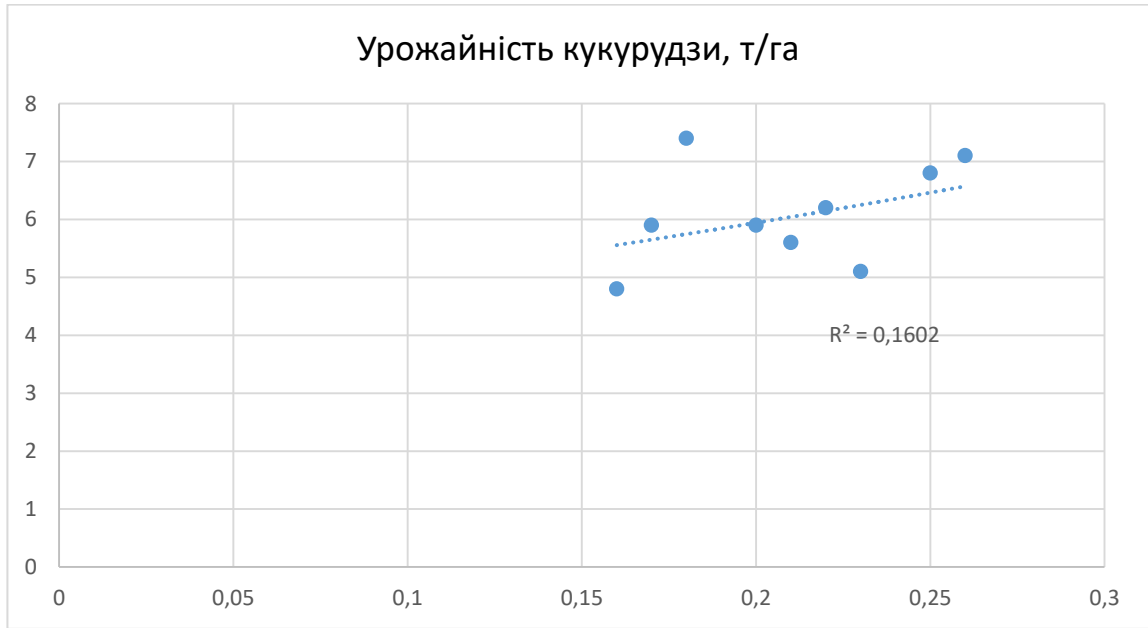


Рис. 3.7. Залежність врожайності від середнього значення індексу GNDVI (цвітіння), т/га

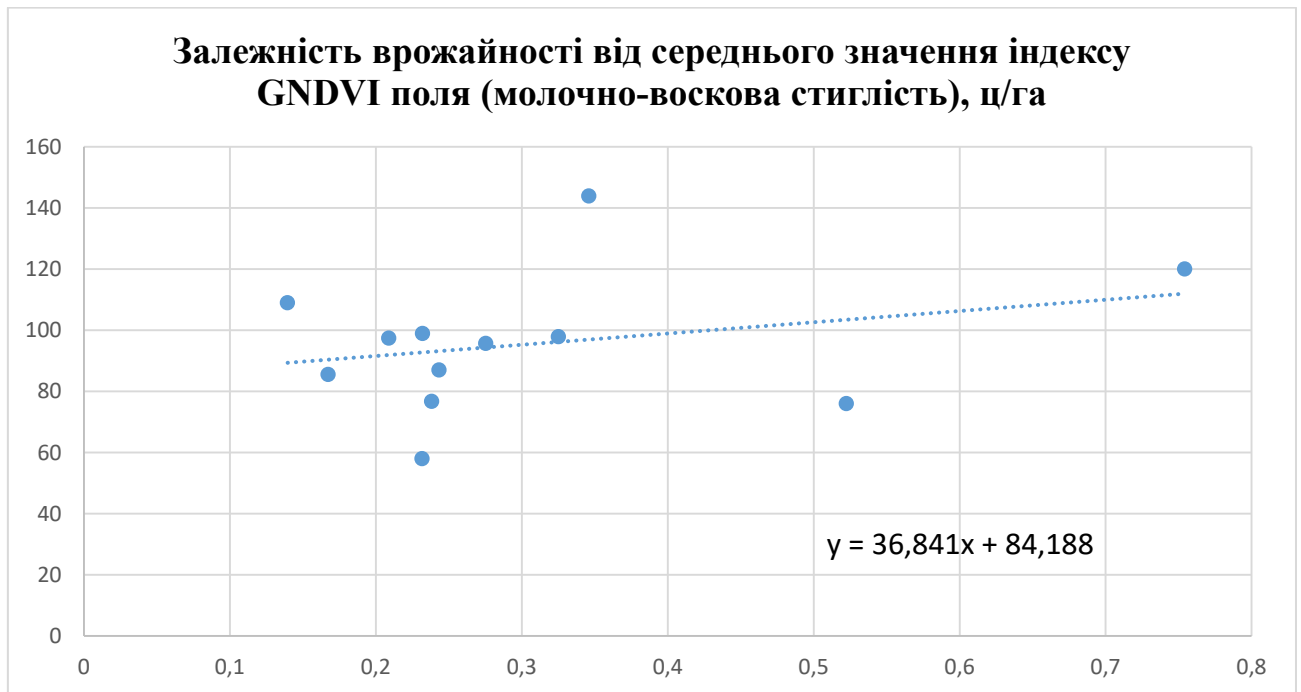
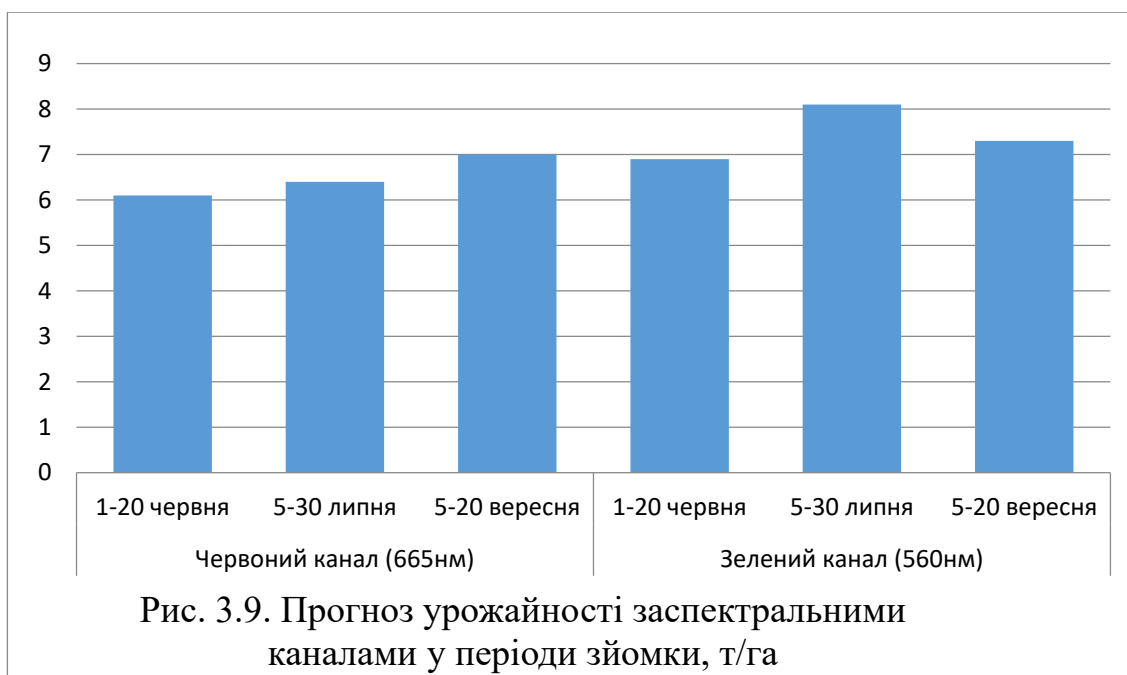


Рис. 3.8. Залежність врожайності від середнього значення індексу GNDVI (молочно-воскова стиглість), т/га

Математична обробка показала відсутність тісної кореляції між досліджуваними параметрами. Проте, розроблені моделі дозволяють вибірково оцінювати стан рослин протягом вегетації. Паралельно проводили наземні

досліджень. Вони включали фенологічні спостереження, біометричну діагностику.

**Прогностична модель врожайності кукурудзи** розроблялась на основі середнього відносного значення пікселю, індексу лінії тренду та врожайності. Для прогнозування результатів використовували різні канали сенсорів супутника, обраховані вегетаційні індекси. За допомогою ПЗ MS Excel дані були оброблені, отримані результати наведені на діаграмах (рис. 3.9-3.10).



Розбіжність результатів прогнозу урожайності з реальною величиною (8 т/га) за використання каналів становить: червоного спектру 1,0-1,6 т/га, зеленого – 0,4-1,2 т/га, що в середньому даватиме вірогідність прогнозу близько 80 %. Безперечно, такі залежності повинні перевірятися на інших гібридах і в інших умовах вирощування, проте можливість прогнозування врожайності кукурудзи за даними супутникового моніторингу не викликає сумніву.

### 3.4. Фенологічний моніторинг і біометрична оцінка посівів кукурудзи

Фенологічні спостереження та біометричний контроль стану посівів є ключовими елементами системи оцінки розвитку кукурудзи та формування прогнозу майбутньої врожайності. Вони забезпечують детальне відстеження

змін у рості рослин протягом усього вегетаційного періоду, дозволяють своєчасно виявляти відхилення та визначати реакцію культури на умови вирощування.

Фенологічний аналіз передбачає послідовну фіксацію стадій росту кукурудзи відповідно до міжнародно визнаних шкал (зокрема BBCH або V–R шкали - vegetative/reproductive). При цьому контролюються такі основні етапи: походження сходів (VE); активний листоутворювальний період (V2–V12); формування вегетативної маси та кущення (V6–V8); вихід волоті (VT); цвітіння (R1); формування, налив і дозрівання зерна (R2–R6).

Аналіз тривалості та інтенсивності проходження відповідних фаз допомагає раціонально планувати агротехнологічні операції — від добрив і регуляторів росту до заходів захисту рослин.

Роль фенологічного та біометричного контролю. Системний збір фенологічних і біометричних даних дає змогу: аналізувати стан рослин у динаміці; оцінювати ефективність застосованих елементів технології; уточнювати розрахункові показники потенційної врожайності; підсилювати точність дистанційного моніторингу (індекси NDVI, GNDVI тощо); оптимізувати строки внесення добрив та проведення технологічних операцій. Комплекс фенологічного моніторингу й біометричної діагностики забезпечує повну характеристику фізіологічного стану посівів кукурудзи та є основою для підвищення ефективності системи управління її продуктивністю (табл. 3.5).

Таблиця 3.5.

## Технологічні показники посівів кукурудзи на зерно

Ширина міжрядь, см	Кількість погонних метрів на 1 га	Кількість рослин, шт./ м.п.	Кількість рослин, шт./га	Кількість двійників, шт./га	Частка двійників, %	Кількість пропусків сівалкою, шт./га	Частка пропусків сівалкою, %	Середня відстань між рослинами, см
70	14285,1	5	71,4 тис.	2,15 тис	3	1,42 тис	0,02	20

Біометричні вимірювання охоплювали визначення ряду ключових морфологічних та структурних показників рослин, зокрема: висоти рослин та кількості листків; індексу листової поверхні (LAI); параметрів качана: його довжини, діаметра, висоти прикріплення; кількості рядів і зерен у ряду; маси 1000 зерен та врожайності з облікової площі.

Крім того, проводилася оцінка зовнішніх ознак дефіциту поживних елементів, а також наявності симптомів ураження хворобами чи пошкоджень шкідниками. Це дозволяло оперативно реагувати на стресові фактори.

### 3.5. Урожай, структура та якість

Розрахунок структури врожаю було виконано з урахуванням просторової неоднорідності посівів, ідентифікованої за допомогою індексу NDVI. Для цього використовували карту продуктивності (рис. 3.11.-3.12), сформовану на основі супутникових даних Sentinel-2 станом на 15.07.2022 р.

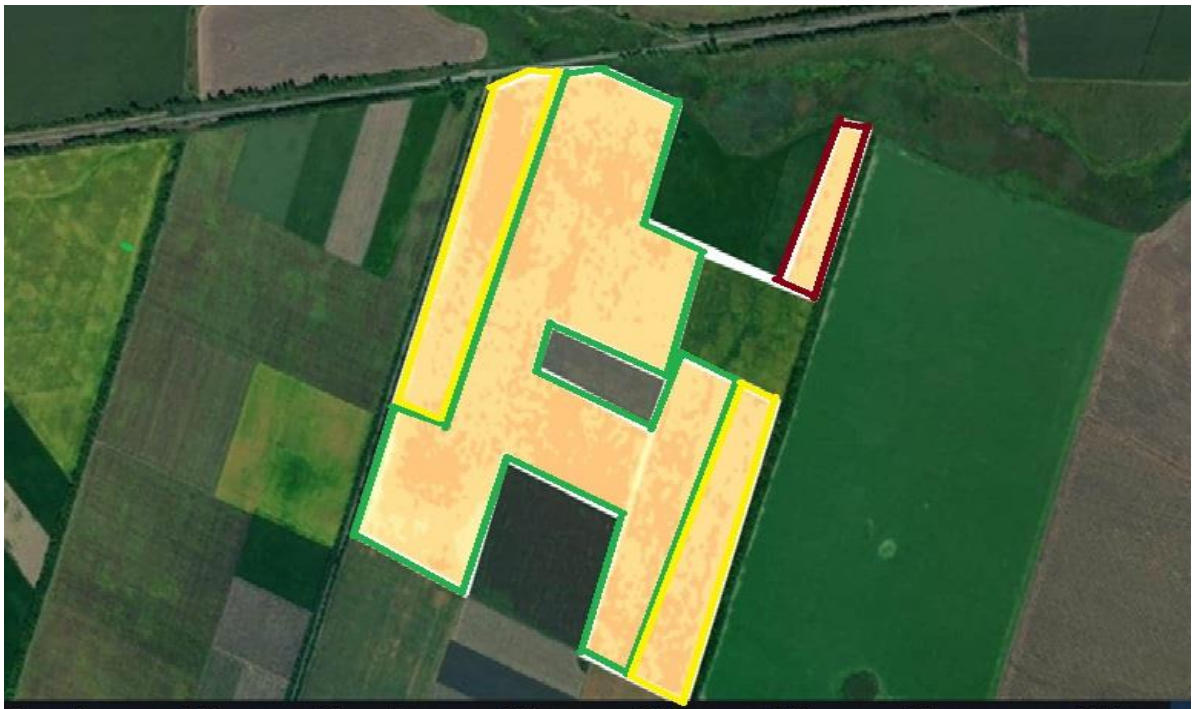


Рис. 3.11. Картограма розподілу вегетативної маси посівів кукурудзи на полі



Рис. 3.12. Картограма розподілу вегетативної маси посівів кукурудзи на полі

За результатами аналізу NDVI у межах дослідного поля було виділено три зони продуктивності, що відрізнялися рівнем розвитку рослинної маси та займали відповідні частки площі:

- низькопродуктивна зона – 5 % площі;
- середньопродуктивна зона – 25 % площі;
- високопродуктивна зона - 70% площі.

Відбір зразків качанів для встановлення структури врожаю здійснювався репрезентативно по кожній із виділених зон, що дозволило врахувати просторову мінливість продуктивності на полі та отримати об'єктивні показники врожайності. Структура врожаю та її якість наведені в таблиці 3.5.

Неоднорідність посівів була спричинена рельєфом поля. А зона низької продуктивності як рельєфом, так і близькістю до доступу людей. Відбір зразків проводився на початку вересня. За результатами лабораторного аналізу зразків зерна кукурудзи, відібраних у межах трьох виділених зон продуктивності, встановлено наступні закономірності (табл. 3.6).

Таблиця 3.5

## Елементи структури врожаю

Показник	Рівень забезпечення		
	високий	середній	низький
Кількість рядів, шт.	37,4	34,6	26
Зерен у ряду, шт.	17,2	16,8	15,6
Середнє значення зерен у початку	654,48	574,28	405,6
Маса початку, г	306,3	208,4	121,8
Довжина початку, см	19,98	17,02	13,6
Маса 1000 насінин, г.	202,9	151,7	142,1
Врожайність, т/га	8,44	6,33	5,21
Середня врожайність, т/га	6,31		

Таблиця 3.6

## Показники якості зерна кукурудзи дослідних ділянок

Показник	Зона продуктивності		
	низька	середня	висока
Вміст жиру, %	4,1	4,4	4,2
Вміст білку, %	10,8	10,5	10,7
Вологість, %	25	29,7	27,7
Вміст крохмалю, %	67,9	68,9	69,8
Маса 1000, г	142,1	151,7	202,9

Якість зерна визначали на приладі Infratec 1214. Удобрення культури сприяло утворенню білків і крохмалю у зерні, але не підвищує вміст олії порівняно з даними у контролі. Отримані результати свідчать, що найвищі показники продуктивності спостерігалися у високоінтенсивній зоні. Зокрема, маса 1000 зерен у цій зоні була суттєво більшою і становила 202,9 г, що на 42,6

% вище порівняно з низькопродуктивною ділянкою. Це вказує на кращі умови росту рослин та вищу реалізацію їх потенціалу.

Вміст крохмалю також збільшувався в міру зростання продуктивності ділянок, досягаючи 69,8% у високопродуктивній зоні, що на 1,9% вище, ніж у низькопродуктивній. Така тенденція характерна для кукурудзи, оскільки оптимальні умови живлення та водозабезпечення сприяють накопиченню запасних речовин у зерні.

Щодо вмісту білка, спостерігалися незначні коливання, без чітко вираженої тенденції, що узгоджується з даними про те, що білок менш чутливо реагує на зміну зон продуктивності порівняно з крохмалем.

Вологість зерна була найвищою у середній зоні продуктивності (29,7%) і дещо нижчою у високій (27,7 %) та низькій (25,0 %) зонах, що може бути пов'язано з тривалістю дозрівання та відмінностями в густоті стояння рослин.

#### РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ

Регіон: орієнтир схід від Вінниці. Площа розрахунку: 1 га

Гібрид: Mayflower (Lidea), норма висіву — 65 000 насінин/га

Урожайність (вхідні дані): 8,0 т/га. Ціна реалізації зерна: 8 000 грн./т.

Економічна оцінка виробництва є ключовим елементом у плануванні діяльності аграрного підприємства, адже вона дає змогу оптимально оцінити співвідношення між витратами та результатами роботи. Такий аналіз дозволяє аргументовано визначати ефективність використання земельних, трудових і матеріальних ресурсів.

У межах цього розрахунку подано економічну оцінку вирощування кукурудзи на одному гектарі площі для господарства, розташованого у східній частині Вінницької області. Для вирощування культури застосовано сучасну технологію з використанням високопродуктивного гібриду Mayflower (Lidea), який висівається з нормою 65 тисяч насінин на гектар.

Основне удобрення полів здійснювалося внесенням карбаміду у фізичній масі 200 кг/га, а додаткове позакореневе підживлення виконувалося у кількості 5 кг/га карбаміду та 5 кг/га сульфату амонію. Захист рослин забезпечувався використанням комплексу засобів: гербіцид Альфа-дикамба, біопрепарати Цифос Органік і Metabo Vt, фунгіцид Альпіна, інсектицид Логус, амінокислотний комплекс Інфініті. Наприкінці вегетаційного періоду застосовувався десикант Раугар. Така комбінація препаратів сприяє оптимальному розвитку рослин і забезпечує стабільну врожайність.

Формування виробничої собівартості здійснюється на основі трьох основних категорій витрат: матеріальних, операційних і додаткових. До матеріальних включаються затрати на насіння, добрива та засоби захисту рослин. Операційні охоплюють витрати на паливо, оплату праці й використання дронів для обробки. Додаткові витрати включають орендну плату, податки та супутні витрати, що виникають під час збирання й транспортування врожаю.

Таблиця 4.1.

Матеріальні витрати (грн/га):			
Стаття	Норма	Ціна/од.	Вартість, грн/га
Насіння Mayflower (Lidea)	65 000 нас.	8 249 грн / 80 000 нас.	6702.31
Карбамід (основне)	200 кг	≈30.888 грн/кг (після +10%)	6177.60
Карбамід (листом)	5 кг	≈30.888 грн/кг	154.44
Сульфат амонію (листом)	2,5 кг	≈17.27 грн/кг	86.35
Альфа-дикамба (гербіцид)	0,2 л	≈577.5 грн/л (після +10%)	115.50
Цифос Органік	1,0 л	≈267.3 грн/л	267.30
Фунгіцид Альпіна	0,75 л	≈794.2 грн/л (після +10%)	595.65
Metabo Bt	3,0 л	≈165 грн/л (після +10%)	495.00
Ад'ювант (Super)	0,015 л	≈704 грн/л (після +10%)	10.56
Інфініті (амінокислоти, гумати)	0,7 л	≈710.6 грн/л (після +10%)	497.42
Раугар (десикація)	3,0 л	≈187 грн/л (після +10%)	561.00

Разом матеріали: 15663.13 грн/га

Таблиця 4.2.

Операційні витрати (грн./га)		
Стаття	Кількість	Вартість, грн/га
Обприскування (оплата трактористу)	3 × 40 грн	120.00
Паливо дизельне	2.4 л	56.41 грн/л
Вартість пального, грн/га		135.38
Обробка дроном	2 × 300 грн	600.00

Разом операції: 855.38 грн/га

Таблиця 4.3.

Інші витрати (грн/га):	
Стаття	Вартість, грн/га
Орендна плата за пай	10 000.00
Інші витрати (збирання, сушка, логістика, підготовка ґрунту, амортизація, зарплата, тощо)	12000.00
Податки (узгоджено)	3 000.00

4. Загальні витрати (грн/га): 41518.51

5. Доходи та фінансові показники (грн/га):

- Валова виручка =  $8,0 \text{ т} \times 8\,000 \text{ грн/т} = 64000.00$

- Загальні витрати = 41518.51

- Чистий прибуток = 22481.49

- Рентабельність = 35.14 %

Отже, сумарні витрати на вирощування кукурудзи становлять приблизно 35,3 тис. грн на гектар. За рівня врожайності, що досягає 8 т/га, та реалізаційної вартості 8 000 грн. за тонну, валовий дохід складає 64 тис. грн/га, тоді як чистий прибуток становить 22,5 тис. грн/га.

Рентабельність виробництва досягає близько 35 %, що свідчить про високу ефективність цього напряму сільськогосподарського підприємництва. З огляду на результати проведеної економічної оцінки, можна стверджувати, що вирощування кукурудзи в умовах господарств, розташованих на території Східної Вінницької області, є рентабельним та економічно виправданим.

Висока продуктивність обраного гібриду, раціонально розроблена система удобрення та захисту рослин, а також ефективне використання технічного обладнання забезпечують сталі фінансові результати та конкурентоспроможність сільськогосподарського виробництва.

## ВИСНОВКИ

Кукурудза належить до культур, для яких прогнозування врожайності за матеріалами дистанційного зондування становить певну складність. Це зумовлено значною біомасою, особливостями морфологічної будови (зокрема жилкуватістю листків), що спричиняє спектральні спотворення та підвищує похибку інтерпретації даних. Використання супутникових платформ із високою просторовою роздільністю забезпечує більш точне виділення спектральної відповіді окремих рослин і деталізацію стану агроценозу, проте висока вартість таких даних не завжди є економічно обґрунтованою для аграрних підприємств. Застосування відкритих супутникових сервісів та моделей врожайності на їх основі дає можливість господарствам оперативного отримувати прогноз урожайності та оптимізувати систему управління полями.

### **Основні висновки:**

- 1. Найбільш достовірними для прогнозування врожайності кукурудзи за відкритими супутниковими даними є зйомки Sentinel-2 Європейської програми Copernicus, які забезпечують безкоштовний доступ до попередньо оброблених даних з просторовою роздільністю 10 м/піксель.**
- 2. Побудова моделі прогнозування врожайності на основі трендової залежності між середнім значенням спектральних показників та фактичним урожаєм дозволяє встановити кореляційний зв'язок між спектральною інформацією і продукційними процесами в посівах кукурудзи.**
- 3. Похибка прогнозу врожайності, отриманого з використанням лише спектральних каналів, становить у середньому 3,1 т/га для червоного діапазону та 3,9 т/га для зеленого, що забезпечує достовірність прогнозу на рівні  $\approx 73\%$ .**
- 4. Найбільш інформативними для оцінювання продуктивності посівів є вегетаційний індекс GNDVI, які забезпечили точність прогнозу близько 87%, що підтверджує доцільність їх застосування в аналітичних розрахунках.**

5. Точність прогнозування врожайності на основі окремих спектральних каналів становила 80–84 %, що свідчить про їх високу, але нижчу порівняно з індексами, прогностичну цінність.

6. Перевага вегетаційних індексів полягає у більшій стабільності прогнозів, незалежно від дат супутникової зйомки, тоді як моделі, засновані на спектральних каналах, виявили більшу чутливість до часу отримання знімків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дистанційний моніторинг агрофітоценозів: навч. Посібник. Н. А. Пасічник, О. О. Опришко, О. М. Піскун, С. О. Сластін (Рекомендовано Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол №10 від 24 квітня 2023 р.) – К.:НУБіП України, 2023. – 490 с.
2. Інститут зернових культур НААН України. (2022). *Рекомендації з технології вирощування кукурудзи в умовах Лісостепу та Степу України*.
3. FAO. (2021). *FAOSTAT Statistical Database: Maize production and productivity trends*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
4. Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2023). Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133, 48–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.12.003>
5. Ritchie, S. W., Hanway, J. J., & Benson, G. O. (2023). *How a corn plant develops* (Special Report No. 48). Iowa State University of Science and Technology.
6. Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2001). Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7–8), 921–950.
7. Скільки зернових експортує Україна // Слово і діло URL: <https://www.slovoidilo.ua/2022/02/22/infografika/ekonomika/skilky-zernovux-eksportuye-ukrayina>
8. Al-Shammari, D., Al-Saady, Y., & Al-Mashhadani, H. (2025). Assessment of red-edge based vegetation indices for crop monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, Article 101067.
9. Darra, N., Sood, R., & Jat, M. (2023). Can satellites predict yield? Ensemble machine learning approaches for crop yield prediction. *International Journal of Remote Sensing*, 44(5), 1550–1572. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2171345>

10. Martínez-Sifuentes, A. R., Escalante-Estrada, J. A., & Tijerina-Chávez, L. (2024). Spectral index-based estimation of total nitrogen in maize plants under field conditions. *Plants*, *13*(2), 412. <https://doi.org/10.3390/plants13020412>
11. Radočaj, D., Popović, A., & Bura, L. (2025). Phenology-based maize and soybean yield potential prediction using Sentinel-2 indices and machine learning algorithms. *Applied Sciences*, *15*(13), 7216. <https://doi.org/10.3390/app15137216>
12. Soccolini, A., Rossi, A., & Marinello, F. (2023). Predictive modelling of maize yield using Sentinel-2 NDVI time series and machine learning. *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 314–326). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37718-1\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37718-1_24)
13. Tarariko, O., Iliencko, T., Kuchma, T., & Novakovska, I. (2019). Satellite agroecological monitoring within the system of sustainable environmental management. *Agricultural Science and Practice*, *6*(1), 18-27. <https://doi.org/10.15407/agrisp6.01.018>
14. Hongkun Tian, Tianhai Wang, Yadong Liu, Xi Qiao, Yanzhou Li (2020) Computer vision technology in agricultural automation — A review. *Information Processing in Agriculture*, Vol.7 (1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006>
15. Лисенко В.П., Пасічник Н.А., Опришко А.А., Комарчук Д.С. Використання БПЛА для дистанційного зондування посівів під час програмування врожаю // Науковий вісник НУБіП України. 2016. Випуск 256. С. 146-150.
16. Al-Shammari, D., Al-Saady, Y., & Al-Mashhadani, H. (2025). Assessment of red-edge based vegetation indices for crop monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *35*, Article 101067.
17. Darra, N., Sood, R., & Jat, M. (2023). Can satellites predict yield? Ensemble machine learning approaches for crop yield prediction. *International Journal of Remote Sensing*, *44*(5), 1550–1572. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2171345>

18. Radočaj, D., Popović, A., & Bura, L. (2025). Phenology-based maize and soybean yield potential prediction using Sentinel-2 indices and machine learning algorithms. *Applied Sciences*, 15(13), 7216. <https://doi.org/10.3390/app15137216>
19. Torres-Madronero, M. C., Rojas-Vargas, J. A., & Ortiz-Rodríguez, J. (2023). Spectral library of maize leaves under nitrogen deficiency stress. *Data*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.3390/data8010002>
20. Torres-Madronero, M. C., Rojas-Vargas, J. A., & Ortiz-Rodríguez, J. (2023). Spectral library of maize leaves under nitrogen deficiency stress. *Data*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.3390/data8010002>
21. Yu, H., Huang, J., & Zhang, X. (2022). A critical review on applications of hyperspectral remote sensing in crop monitoring and stress detection. *Experimental Agriculture*, 58(3), 345–366. <https://doi.org/10.1017/S0014479722000067>
22. Прогнозування врожаю кукурудзи цукрової за даними супутникового моніторингу посівів // Овочі та фрукти URL: <https://www.pro-of.com.ua/prognozuvannya-vrozhayu-kukurudzi-cukrovo%D1%97-za-danimi-suputnikovogo-monitoringu-posiviv/>
23. Ahmed Kayad, Marco Sozzi , Simone Gatto, Francesco Marinello and Francesco Pirotti Monitoring Within-Field Variability of Corn Yield using Sentinel-2 and Machine Learning Techniques // *Remote Sens.* 2019, 11, 2873; doi:10.3390/rs11232873
24. R. Fieuzal \*, C. Marais Sicre, F. Baup. Estimation of corn yield using multi-temporal optical and radar satellite data and artificial neural networks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 57 2017. С. 14-23
25. Yuan, J., Guan, K., & Peng, J. (2024). Grain crop yield prediction using remote sensing and machine learning: A comprehensive review. *Drones*, 8(10), 559. <https://doi.org/10.3390/drones8100559>
26. Прогнозування врожайності кукурудзи за допомогою індексу вегетації та супутникових знімків // SuperAgronom.com URL:

<https://superagronom.com/blog/750-prognozuvannya-vrojajnosti-kukurudzi-za-dopomogoyu-indeksu-vegetatsiyi-ta-suputnikovih-znimkiv>

27. Gitelson, A. A., Peng, Y., Huemmrich, K. F., & Arkebauer, T. J. (2018). Relationship between NDVI and canopy chlorophyll content in crops. *Remote Sensing of Environment*, 217, 74–85.
28. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(7), 2369–2391.
29. Zhou, X., Zhang, Y., & Li, L. (2021). Spectral reflectance characteristics of crops for remote sensing applications. *Agricultural Remote Sensing Journal*, 9(3), 112–124
30. USGS (2025). *Landsat 8–9 Data User Handbook*. U.S. Geological Survey.
31. ESA. (2025). *Sentinel-2 user handbook*. European Space Agency.
32. ESA (2025). *Copernicus open access hub: User guide*. European Space Agency. <https://scihub.copernicus.eu/>
33. Farr, T. G., & Kobrick, M. (2000). Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(48), 583–585. <https://doi.org/10.1029/EO081i048p00583>
34. Gao, F., Jin, X., Ma, J., Wang, C., Li, Z., & Zhao, C. (2022). UAV-based hyperspectral monitoring for crop growth and yield estimation. *Remote Sensing*, 14(3), 556. <https://doi.org/10.3390/rs14030556>
35. Li, Y., Wang, S., Tang, L., & Cao, Q. (2023). Integrating UAV multispectral imagery with field data for nitrogen recommendation in maize. *Precision Agriculture*, 24, 1124–1142. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09961-y>
36. Sánchez, A., Rueda-Ayala, V., Peña, J. M., & Torres-Sánchez, J. (2022). UAV-based crop nutrient monitoring: A review of methods and approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107170. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107170>
37. Teal, R. K., Tubana, B., Girma, K., Freeman, K. W., Arnall, D. B., Walsh, O., & Raun, W. R. (2019). In-season prediction of corn grain yield potential

using normalized difference vegetation index. *Agronomy Journal*, 101(5), 1579–1584. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0007>

38. Zhang, X., Liu, F., Huang, Y., & Yang, G. (2021). Evaluation of narrow band vegetation indices for maize nitrogen diagnosis. *Field Crops Research*, 270, 108230. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108230>

39. QGIS Development Team. (n.d.). QGIS: A free and open source geographic information system. QGIS.org. <https://www.qgis.org/ru/site/index.html>

40. Färgupplevelser (2012, September 21). *Konst & Politik*. <https://anarchyisorder.wordpress.com/2012/09/21/fargupplevelser/>

41. Sentinel Hub. (n.d.). EO Browser. <https://apps.sentinel-hub.com>

42. Інтерактивна карта ґрунтів України. (n.d.). SuperAgronom.com. <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy#close>

43. Заставний, Ф. Д. (1994). Ґрунти України. У: М. П. Парцей (Ред.), *Географія України* (с. 1–472). Львів: Світ.

44. About light spectrum and photosynthesis. (n.d.). Boulderlamp.com. <https://boulderlamp.com/light-spectrum-and-photosynthesis/>

45. Прогнозування врожайності кукурудзи за допомогою індексу вегетації та супутникових знімків. (n.d.). SuperAgronom.com. <https://superagronom.com/blog/750-prognozuvannya-vrojajnosti-kukurudzi-za-dopomogoyu-indeksu-vegetatsiyi-ta-suputnikovih-znimkiv>

46. Пасічник, Н. А., Лисенко, В. П., Опришко, О. О., & Комарчук, Д. С. (2019). *Агрохімічний дистанційний моніторинг фітоценозів*. Київ: НУБіП України.

47. Асанішвілі, Н. М., Корсун, С. Г., & Шляхтурова, С. П. (2014). Якість зерна кукурудзи залежно від технології вирощування в північній частині Лісостепу. *Землеробство*, 1–2, 63–66.

48. Особливості технології вирощування кукурудзи. (n.d.). <https://laboulet.com.ua/corntech-ua/>

49. Пасічник, Н. А., & Степанко, А. В. (2016). Калійне живлення рослин кукурудзи за різних систем застосування добрив. *Науковий вісник*

- НУБІП України. Серія: Агрономія, 235, 204–209.  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau\\_agr\\_2016\\_235\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_agr_2016_235_27)
50. Перспективи кукурудзи. (n.d.). DuPont Ukraine.  
[http://www.dupont.ua/content/dam/dupont/products-and-services/crop-protection/documents/uk\\_ua/Green\\_Pages\\_3\\_2008.pdf](http://www.dupont.ua/content/dam/dupont/products-and-services/crop-protection/documents/uk_ua/Green_Pages_3_2008.pdf)
51. Петриченко, В. Ф., & Лихочвор, В. В. (2014). Рослинництво. Технології вирощування с.-г. культур. Львів.
52. Писаренко, П. В., та ін. (n.d.). Фотосинтетичний потенціал рослин кукурудзи залежно від умов вирощування. <http://mvmip.com.ua/images/2016/Vupusk1/26.pdf>
53. Позакореневе підживлення кукурудзи. (n.d.). <https://makosh-group.com.ua/blog/pozakoreneve-pidzhyvlennya-kukurudzy/>
54. Рухомий фосфор як індикатор якості ґрунту. (n.d.). ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/329626026\\_Rozdil\\_6\\_RUHOMIJ\\_FOSFOR\\_AK\\_INDİKATOR\\_AKOSTI\\_GRUNTU](https://www.researchgate.net/publication/329626026_Rozdil_6_RUHOMIJ_FOSFOR_AK_INDİKATOR_AKOSTI_GRUNTU)
55. Система удобрення кукурудзи. (n.d.). <https://agrosience.com.ua/plant/52-systema-udobrennya-kukurudzy>
56. Каленська, С. М., та ін. (2015). Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві. Вінниця: НУБіП України; ВНАУ.
57. Удобрення кукурудзи. (n.d.). <http://anaitis.com.ua/udobrennya-kukurudzy/>
58. Фосфорна проблема українських чорноземів та шляхи її вирішення. (n.d.). <https://imptorgservis.uaprom.net/a170873-fosforna-problema-ukrayinskih.html>
59. Фурдига, М. (2018). Фосфор як основа вдалого старту. <https://www.profihort.com/2018/05/fosfor-yak-osnova-vdalogo-startu/>
60. Хмелюк, О. (n.d.). Система удобрення кукурудзи. <https://www.lnz.com.ua/news/sistema-udobrenna-kukurudzi>
61. Цехмейструк, М. Г., Музафаров, Н. М., & Манько, К. М. (n.d.). Аспекти вирощування кукурудзи. <http://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/436-aspekty-vyroshchuvannia-kukurudzy.html>
62. Цицюра, Я. Г. (n.d.). Адаптивна стратегія землеробства правобережного Лісостепу України за зміни клімату. <http://repository.vsau.org/getfile.php/16691.pdf>

# ДОДАТКИ

## Індекси карти дослідних полів

### NDVI





### NDMI



### NDMI





MSAVI





Поле 2 NDVI





MSAVI





NDMI



