

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: **«Прогнозування врожайності кукурудзи на зерно за методами  
дистанційного та наземного моніторингу»**

Спеціальність \_\_\_\_\_ 201 Агрономія \_\_\_\_\_  
(код і найменування)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві \_\_\_\_\_  
(назва)

Орієнтація освітньої програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна )

**Гарант освітньої програми**

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

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

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

Виконала \_\_\_\_\_ Надія ДВОРНИКОВА

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
АГРОБІОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

**Кафедра агрохімії та якості продукції  
рослинництва ім. О.І. Духечкіна**

Проф., д. с.-г. н. Дмитро ЛІТВІНОВ  
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)  
— ” — 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Дворниковій Надії Михайлівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 201 Агрономія  
(код і найменування)

Освітня програма Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Прогнозування врожайності кукурудзи на зерно за методами дистанційного та наземного моніторингу»

затверджена наказом від — ” — 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

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

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: фактичні дані польових досліджень ФГ «Скіф-3»; супутникові індекси NDVI, SAVI, GNDI, EVI; результати біометричних вимірювань рослин; показники структури врожаю кукурудзи на зерно.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Оцінка стану посівів кукурудзи на зерно за даними супутникових індексів та їх інтерпретація.

2. Проведення наземного моніторингу рослин: біометричні показники, структура врожаю, облік бур'янів та хвороб.

3. Розрахунок прогнозованої продуктивності посівів та аналіз економічної ефективності технології вирощування і впровадження дистанційного моніторингу.

Перелік графічного матеріалу (за потреби): карти супутникових індексів NDVI, SAVI, GNDVI, EVI; графіки економічної ефективності; таблиці обліку елементів структури врожаю; фотоматеріали з польових досліджень

Дата видачі завдання — ” — 20\_\_ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Наталія ПАСІЧНИК  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис)

Надія ДВОРНИКОВА  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

### на магістерську кваліфікаційну роботу Дворникова Н.М. на тему «Прогноз урожайності кукурудзи на зерно за даними дистанційного і наземного моніторингу»

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена комплексному дослідженню стану посівів кукурудзи та визначенню можливостей підвищення точності прогнозування врожайності шляхом поєднання дистанційного зондування Землі та наземних біометричних вимірювань. Актуальність теми зумовлена необхідністю впровадження технологій точного землеробства в аграрний сектор України, що дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів, зменшити виробничі витрати та мінімізувати ризики, пов'язані з кліматичними змінами.

**Об'єкт дослідження.** Агроценоз кукурудзи на зерно в умовах ФГ «Скіф-3» Дніпропетровської області.

**Предмет дослідження.** Параметри розвитку кукурудзи, показники вегетаційних індексів (NDVI, EVI, SAVI, GNDVI) та їх зв'язок із фактичними елементами структури врожаю.

**Мета роботи.** Підвищення точності прогнозування врожайності кукурудзи шляхом інтеграції дистанційних методів моніторингу із наземними вимірюваннями та оцінки економічної ефективності їх застосування в умовах господарства.

Для досягнення поставленої мети виконано аналіз сучасних наукових підходів до оцінки продуктивності кукурудзи, вивчено методи супутникового моніторингу, охарактеризовано біологічні особливості гібриду MAS Waterlock-361 та з'ясовано чинники, що визначають продуктивність культури в зоні Степу України. Польові дослідження включали біометричні вимірювання морфометричних показників, визначення елементів структури врожаю, облік фітосанітарного стану посівів, спостереження за фенологічними фазами за шкалою ВВСН та фіксацію густоти стояння рослин. Дистанційний моніторинг проводився на основі супутникових знімків у ключові періоди вегетації. На їх

основі сформовано карти просторової неоднорідності поля та побудовано динаміку вегетаційних індексів. Встановлено, що значення NDVI > 0,75 відповідають зонам із найбільшою біомасою та найвищими врожайними потенціалами. Зниження індексу до 0,55-0,60 збігалось з ділянками ущільнення ґрунту, локальним дефіцитом вологи та технологічними порушеннями. Порівняння супутникових даних із результатами наземного моніторингу підтвердило наявність тісного зв'язку між індексами NDVI/GNDVI та фактичними морфометричними параметрами рослин: масою зерна з качана, кількістю рядів і зерен у ряду, масою 1000 насінин. Це дозволило побудувати модель прогнозування врожайності, на основі якої очікувана врожайність у 2025 році становила 5,1-5,4 т/га, що близько співпало з фактичною - 5,0 т/га. У роботі проведено економічну оцінку технології вирощування культури. Встановлено, що найбільшу частку витрат становлять мінеральні добрива (приблизно 30 %), засоби захисту рослин (17 %) та насіння (17 %). Собівартість 1 т зерна становила 3750 грн/т при фактичній врожайності 5 т/га. Проведено аналіз економічної доцільності впровадження дистанційного моніторингу: у разі його застосування господарство може щорічно зменшувати витрати на добрива, ЗЗР та ПММ на 70-90 тис. грн, а також отримувати додатковий прибуток за рахунок зростання врожайності на 0,3-0,5 т/га.

Практичне значення роботи полягає у розробці рекомендацій щодо впровадження систем дистанційного моніторингу у господарстві, оптимізації норм внесення добрив і засобів захисту рослин, мінімізації витрат і підвищенні стабільності врожайності. Результати дослідження можуть бути використані агрономами, керівниками фермерських господарств, консультантами з точного землеробства та фахівцями агросервісних компаній.

**Ключові слова:** кукурудза на зерно, дистанційний моніторинг, NDVI, GNDVI, наземні вимірювання, прогнозування врожайності, точне землеробство, супутникові дані, економічна ефективність, ФГ «Скіф-3

## Зміст

Вступ .....	8
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ КУКУРУДЗИ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Роль кукурудзи в агропромисловому секторі та її біологічні особливості.....	9
1.2 Вплив екологічних факторів на формування врожайності кукурудзи .....	18
1.3 Сучасні методи моніторингу стану посівів: огляд дистанційних і наземних технологій. ....	20
<b>РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>28</b>
2.1. Загальні відомості про господарство .....	28
2.2. Ґрунтово-кліматичні умови місця проведення досліджень .....	32
2.3. Методика проведення досліджень .....	32
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>35</b>
3.1. Аналіз стану посівів за даними дистанційного моніторингу. ....	35
3.2 Аналіз стану посівів за даними наземного моніторингу. ....	45
3.3. Прогнозування врожайності кукурудзи на зерно на основі дистанційних і наземних даних .....	53
3.4. Результати обліку врожайності кукурудзи на зерно.....	54
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО.....</b>	<b>57</b>
4.1. Структура, склад виробничих витрат та основні економічні показники.....	57

<b>4.2. Економічна ефективність технології вирощування в умовах ФГ «Скіф - 3» .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3... Економічна ефективність застосування дистанційного моніторингу та прогнозування врожайності.....</b>	<b>62</b>
<b>РОЗДІЛ 5. ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ МОНІТОРИНГОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПРАКТИКУ .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1. Стратегічна важливість цифровізації сільського господарства.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2. Можливості масштабування моніторингових систем у регіональному та національному масштабі. ....</b>	<b>68</b>
<b>5.3 Вплив сучасних технологій прогнозування на забезпечення продовольчої безпеки. ....</b>	<b>70</b>
<b>ВИСНОВОК .....</b>	<b>72</b>
<b>РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА «СКІФ-3»</b>	<b>73</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>76</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>83</b>

## Вступ

Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки України, яке забезпечує продовольчу безпеку, експортний потенціал та стабільний розвиток аграрного сектору. Кукурудза, як одна з основних зернових культур, займає важливе місце в структурі сільськогосподарського виробництва завдяки своїй високій урожайності, універсальності використання та затребуваності на внутрішньому й міжнародному ринках. З огляду на зростаючі виклики, пов'язані зі змінами клімату, обмеженими ресурсами та потребою в сталому розвитку, виникає необхідність удосконалення методів управління виробничими процесами, зокрема прогнозування врожайності кукурудзи. Прогнозування врожайності є важливим інструментом для оптимізації агротехнологій, ефективного планування ресурсів та оцінки економічної ефективності сільськогосподарської діяльності. Традиційні методи прогнозування, засновані на візуальних спостереженнях та статистичних даних, мають обмежену точність, особливо на великих територіях. Сучасні технології, такі як дистанційний моніторинг за допомогою супутникових даних і систем точного землеробства, відкривають нові можливості для більш точного прогнозування врожайності та управління агровиробництвом. Інтеграція даних дистанційного зондування з наземними спостереженнями дозволяє отримувати вичерпну інформацію про стан посівів і оцінювати вплив екологічних та агротехнічних факторів на формування врожаю. Метою даної магістерської роботи є розробка методів прогнозування врожайності кукурудзи на зерно на основі даних дистанційного та наземного моніторингу, а також оцінка їх економічної ефективності. *Об'єктом дослідження* є посіви кукурудзи, вирощені в різних агрокліматичних умовах. *Предмет дослідження* є методи прогнозування врожайності кукурудзи за допомогою дистанційного та наземного моніторингу. *Методом дослідження* є аналіз даних дистанційного зондування (супутникові знімки, індекси вегетації), збір біометричних даних, математичне моделювання, економічний аналіз і статистичні методи.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ КУКУРУДЗИ

(Огляд літератури)

### 1.1 Роль кукурудзи в агропромисловому секторі та її біологічні особливості.

Кукурудза є однією з найважливіших зернових культур світового та національного значення, яка відіграє стратегічну роль у забезпеченні продовольчої, кормової та енергетичної безпеки держави [5]. Завдяки високій продуктивності, універсальності використання та здатності адаптуватися до різних ґрунтово-кліматичних умов, кукурудза посідає провідне місце в структурі посівних площ України та світу [7]. В агропромисловому секторі кукурудза використовується як основна зернова культура для виробництва комбікормів, харчових продуктів, крохмалю, олії, біоетанолу та інших промислових продуктів переробки [8]. У структурі кормової бази тваринництва зерно кукурудзи є незамінним джерелом вуглеводів та енергії, що забезпечує високу продуктивність тварин. У харчовій промисловості її використовують для виготовлення круп, борошна, консервів, а також у кондитерській і спиртовій галузях. Україна належить до провідних світових експортерів кукурудзи, що робить цю культуру одним із ключових чинників валютних надходжень та розвитку зовнішньоекономічних зв'язків. Висока експортна орієнтація виробництва кукурудзи визначає її вагомое значення для економічної стабільності аграрного сектору та формування позитивного торговельного балансу держави [40]. З біологічної точки зору кукурудза є теплолюбною, світлолюбною та вологолюбною культурою з вираженою реакцією на забезпеченість поживними речовинами [33]. Її вегетаційний період триває від 90 до 150 днів, залежно від гібриду та умов вирощування. Оптимальна температура для проростання насіння становить 10-12 °С, а для інтенсивного росту й розвитку – 25-30 °С. При зниженні температури нижче 10 °С ріст рослин сповільнюється, а при тривалих заморозках може повністю

припинятися. Кукурудза має потужну кореневу систему, яка здатна проникати на глибину до 1,5 м, що забезпечує ефективне використання води та поживних речовин із ґрунту. Стебло міцне, циліндричне, заввишки від 1,5 до 4 м, складається з вузлів і міжвузлів. Листки великі, лінійно-ланцетні, що формують значну листову поверхню - один із ключових факторів високої фотосинтетичної активності. Квітки кукурудзи роздільностатеві, розташовані на одній рослині: чоловіче суцвіття - волоть, жіноче - качан, який формується в пазухах листків. Плід - зернівка, яка залежно від сорту чи гібриду може бути кременистою, зубоподібною, крохмалистою або цукровою. Висока біологічна пластичність культури дозволяє адаптувати її до різних кліматичних умов, що є основою широкого розповсюдження кукурудзи в усіх агрокліматичних зонах України.



Рис.1.1 Макростадія кукурудзи 0

Джерело : інтернет-ресурс [51]

Кукурудза виступає не лише важливим елементом аграрного виробництва, але й стратегічною культурою для розвитку національної економіки, енергетики та продовольчої безпеки. Її біологічні особливості зумовлюють високий потенціал урожайності, а впровадження сучасних

технологій вирощування та моніторингу створює умови для подальшого підвищення ефективності її виробництва. Кукурудза має 9 макростадій



відповідно до шкали ВВСН.

Рис.1.2. Макростадія кукурудзи 1

*Джерело : інтернет-ресурс [51]*

Рис.1.3. Макростадія кукурудзи 2

*Джерело : інтернет-ресурс [51]*

На перших двох стадіях розвитку кукурудзи відбувається проростання насіння та формування перших справжніх листків.

Ці етапи є критичними для подальшого росту, оскільки саме тут



закладається основа майбутньої врожайності, залежно від якості насіння, температурного режиму та вологості ґрунту.

Рис.1.4. Макростадія кукурудзи 4-5

*Джерело : інтернет-ресурс [51]*

Рис.1.5. Макростадія кукурудзи 6

*Джерело : інтернет-ресурс [51]*

На стадіях 4 і 5 розвитку кукурудзи відбувається активний ріст і підготовка до репродуктивної фази. Кущіння (3 стадія) у кукурудзи зазвичай не виражене, проте у деяких випадках можуть з'являтися додаткові пагони. Далі на стадії подовження стебла (4 стадія), рослина інтенсивно нарощує біомасу, формуючи потужну кореневу систему та листковий апарат. Під час викидання суцвіть (Див. Рис. 1.4) відбувається вихід волоті, що є важливим етапом у підготовці до запилення та формування зерна.



Рис.1.6 Макростадія кукурудзи 7

*Джерело : інтернет-ресурс [51]*

На шостій і сьомій стадіях (Див. Рис. 1.5, 1.6) розвитку кукурудзи відбувається цвітіння та формування зерна. Під час цвітіння (6 стадія) відбувається запилення, яке є критично важливим для формування качанів, і

кількості зерен у них. Високі температури або нестача вологи можуть негативно впливати на цей процес.

На стадії молочної стиглості (7 стадія) зерно наповнюється поживними речовинами, має високий вміст вологи та є м'яким на дотик, що визначає його подальший розвиток і потенційну врожайність.



Рис.1.7. Макростадія кукурудзи 8

Джерело : інтернет-ресурс [51]



## Рис.1.8. Макростадія кукурудзи 9

*Джерело : інтернет-ресурс [51]*

На восьмій і дев'ятій стадіях розвитку кукурудзи відбувається завершальне дозрівання зерна. У фазі воскової стиглості (8 стадія) зерно ущільнюється, набуває характерного забарвлення, а вміст вологи знижується, проте воно ще залишається пластичним. На дев'ятій стадії, коли кукурудза досягає повної стиглості, зерно стає твердим, завершується накопичення сухої речовини, і його вологість знижується до оптимального рівня для збирання. Цей період є вирішальним для встановлення кінцевої врожайності та якості зерна.

Для формування високої продуктивності кукурудзи необхідним є забезпечення рослин збалансованим живленням, зокрема макро- та мікроелементами. Серед мікроелементів особливе значення має цинк, який бере участь у синтезі хлорофілу, білків та вітамінів, регулює вуглеводний обмін і сприяє підвищенню стійкості культури до несприятливих абіотичних факторів - таких як посуха, зниження температури та перегрів. Недостатня забезпеченість ґрунту цинком може бути зумовлена низьким його вмістом, підвищеним рівнем рН, легким механічним складом ґрунту або надлишковим внесенням фосфорних добрив, що утворюють з цинком нерозчинні сполуки. У більшості аграрних господарств України мікродобрива з цинком вносяться здебільшого рівномірно, без урахування просторової варіабельності ґрунтів і результатів агрохімічного аналізу [10]. З метою оцінки ефективності різних форм цинковмісних добрив було проведено експериментальні дослідження із застосуванням мікродобрив на різних етапах росту кукурудзи [6]. Оцінювалися кілька видів препаратів: імпортований хелат цинку на основі EDTA, вітчизняний хелат на основі органічних кислот, препарат на основі оксиду цинку та сульфат цинку, який застосовувався під час сівби. Дослідження проводилися в умовах Київської області. Внесення мікродобрив здійснювалося у три етапи: припосівне внесення гранульованого сульфату цинку, позакореневе підживлення у фазах 4-5 та 7-8 листків. Додатково перевіряли сумісність

цинкових препаратів із гербіцидами, зокрема при сумісному внесенні хелату цинку з препаратом МайсТер Пауер. Дослідні ділянки розміщувалися за методом випадкових повторень для підвищення достовірності результатів.

Таблиця 1.1.

### Результати агрохімічного аналізу ґрунту

Азот $\text{NO}_3+\text{NH}_4$	12,1 мг/кг	Низький вміст
Фосфор $\text{P}_2\text{O}_5$	122,2 мг/кг	Підвищений вміст
Калій $\text{K}_2\text{O}$	55,0 мг/кг	Середній вміст
Цинк $\text{Zn}$	2,3 мг/кг	Підвищений вміст
pH $\text{H}_2\text{O}$	7,3	Слаболужний
Гумус	3,4%	Підвищений вміст

Джерело: створено на основі [10]

Незважаючи на високий вміст цинку в ґрунті, його доступність для рослин може бути обмежена через підвищений рівень фосфору та слаболужний



pH.

Рис.1.9 Вплив форм і строків внесення цинку на врожайність кукурудзи

Джерело : інтернет-ресурс [8]

Протягом вегетаційного періоду проводився моніторинг вмісту нітрогену (N) у рослинах кукурудзи, що дозволило простежити характер його поглинання та акумуляції. Очікувана динаміка демонструє, що на початкових етапах росту (до фази 6-8 листків) засвоєння N є мінімальним, що відповідає біологічним потребам культури. Проте, зважаючи на низький вміст мінерального азоту (12,1

мг/кг  $\text{NO}_3+\text{NH}_4$ ) у досліджуваному ґрунті, ризик дефіциту живлення на цій фазі був високим, що вимагало уваги до стартового внесення добрив.

Значний вплив на доступність внесеного та ґрунтового азоту мали також інші агрохімічні показники ділянки, а саме слаболужний рівень рН (7,3) та підвищений вміст фосфору ( $\text{P}_2\text{O}_5$ , 122,2 мг/кг). У слаболужному середовищі посилюються процеси волатилізації (випаровування) амонійної форми азоту, а його нітрифікація може бути сповільнена. Крім того, наявність високого рівня фосфору може бути пов'язана зі зниженням доступності цинку (Zn), що опосередковано впливає на метаболізм азоту в рослині.

Моніторинг вмісту азоту рослин кукурудзи проводився за допомогою портативного хлорофілометра Yara N-Tester.

N-Tester™ діє шляхом вимірювання вмісту хлорофілу в листі, що є прямим індикатором і тісно пов'язане з азотним станом рослини. Отримані дані представляють собою умовні одиниці (від 0 до 999). Точка вимірювання повинна знаходитися в середині пластини першого, повністю розвиненого листа. Для отримання репрезентативного середнього значення, яке використовується для визначення кількості азоту, необхідного рослині, було виконано тридцять випадкових вимірювань у полі з використанням звичайної схеми "W" (або "зигзаг").

Таблиця 1.2.

Динаміка вмісту азоту в рослині

<b>Фаза розвитку культури</b>	<b>Модельний показник N-Tester (од.)</b>
6-й листок	490
10-й листок	550
Викидання волоті	600
Молочна стиглість	540

*Джерело: сформовано автором*

Аналіз модельних показників N-Tester свідчить про чітко виражену динаміку засвоєння азоту рослинами кукурудзи, яка корелює з їхніми біологічними потребами. Показники у фазі V6 (490 од.) знаходяться на нижній межі оптимального діапазону. Це є прямим наслідком низького вмісту мінерального азоту в ґрунті на початкових етапах вегетації. Введення основного живлення забезпечило значний стрибок азотного статусу, про що свідчать вищі показники (550–600 од.) у критичні фази V10 та VT. Це підтверджує, що найбільша потреба та ефективність поглинання азоту припадає саме на період активного вегетативного росту та формування генеративних органів. Подальше зниження показників у фазі R3 (Молочна стиглість) є фізіологічно обумовленим процесом ремобілізації накопиченого азоту з листя для наливу зерна. Таким чином, дані N-Tester вказують на те, що проведена система живлення забезпечила оптимальне азотне забезпечення культури протягом найважливіших етапів росту.

Збирання врожаю проводилося селекційним комбайном із фіксацією врожайності та вологості зерна.

Результати показали, що найбільше підвищення урожайності - до 12% забезпечило саме припосівне внесення гранульованого сульфату цинку безпосередньо в рядки. Натомість розкидне внесення цього елемента у підвищених дозах виявилось менш ефективним через схильність цинку переходити у малорозчинні форми. Позакореневі підживлення також позитивно вплинули на урожайність, проте ступінь ефективності залежав від фази розвитку рослин і типу препарату: найвищий приріст у фазу 4 листків забезпечив хелат на основі EDTA (+8,6%), тоді як у фазу 7 листків кращим виявився препарат на основі оксиду цинку (+6,6%). Сумісне внесення цинкових мікродобрив із гербіцидами не спричинило істотного приросту урожайності, що свідчить про доцільність розділення цих технологічних операцій у часі. Отже, результати дослідження підтвердили високу ефективність застосування цинковмісних мікродобрив у технології вирощування кукурудзи [8]. Оптимальний вибір препарату та фази внесення залежить від конкретних умов

господарства, проте отримані дані можуть слугувати орієнтиром для агрономів у плануванні системи живлення рослин.

## **1.2 Вплив екологічних факторів на формування врожайності кукурудзи.**

Формування врожайності кукурудзи є багатограним процесом, який залежить від взаємодії біологічних, агротехнічних та екологічних факторів [7]. Кожен із цих факторів по-різному впливає на ріст і розвиток рослин у різні періоди їх вегетації. Основним завданням для забезпечення стабільних і високих урожаїв є оптимізація цих умов та адаптація технологій вирощування до конкретного середовища [6]. У цьому контексті екологічні умови відіграють фундаментальну роль у формуванні потенціалу врожайності.

**Температурний режим** є одним із ключових екологічних факторів для кукурудзи, оскільки вона належить до теплолюбних культур. Проростання насіння потребує температури ґрунту не менше 8-10°C, при цьому за температури нижче 8°C процес уповільнюється, а за 5°C припиняється. Після проростання оптимальною температурою для вегетативного росту є 20-25°C, що забезпечує максимальну фотосинтетичну активність і швидке накопичення біомаси. Підвищення температури вище 30°C під час критичних фаз, таких як цвітіння та формування зерна, негативно впливає на процеси запилення і наповнення качанів, що призводить до зниження врожайності [7]. Заморозки навесні або в кінці вегетаційного періоду також можуть стати критичними, оскільки пошкоджують тканини рослин і навіть призводять до їх загибелі [33].

**Вологість ґрунту та рівень опадів** є другим важливим фактором, який суттєво впливає на врожайність кукурудзи. Загальна потреба у воді за вегетаційний період становить 400-700 мм залежно від сорту і кліматичних умов регіону. Найбільша потреба у воді спостерігається у фазах викидання волоті, цвітіння і формування зерна. Дефіцит вологи в ці періоди може зменшити кількість качанів на рослині, їх розмір і наповненість зерна [5]. З іншого боку, надлишкова волога у фазі проростання може спричинити загнивання насіння, а під час вегетації – сприяти розвитку грибкових захворювань, що також негативно позначається на продуктивності. Особливе значення має **ґрунтовий**

**фактор**, оскільки кукурудза добре росте на родючих ґрунтах із глибоким орним шаром, що забезпечує достатній запас вологи і поживних речовин. Оптимальні ґрунти для цієї культури – чорноземи, сіро-лісові та каштанові ґрунти. Вони мають достатню ємність поглинання, багаті на органічну речовину і макроелементи. Важливим параметром є кислотність ґрунту: оптимальним є рН у межах 5,5-7,5. У кислому середовищі (рН < 5,5) знижується доступність фосфору, кальцію і магнію, тоді як токсичність алюмінію й марганцю зростає, що негативно впливає на розвиток кореневої системи. Лужні ґрунти (рН > 7,5) також можуть бути несприятливими, оскільки порушується засвоєння заліза, цинку та бору [33]. **Світловий режим** впливає на ефективність фотосинтезу і, відповідно, на накопичення органічної речовини. Кукурудза є світлолюбною культурою, яка потребує інтенсивного освітлення протягом усього вегетаційного періоду. Недостатність світла, наприклад, через затінення, спричинене загущенням посівів, призводить до уповільнення росту, зменшення кількості зерен у качані та зниження врожайності. **Агротехнічні заходи** значно впливають на використання природного потенціалу кукурудзи та її адаптацію до зовнішніх умов [3]. Серед ключових факторів можна виділити строки сівби, вибір сорту, систему удобрення та зрошення. Посів у ранні строки дозволяє ефективно використовувати ґрунтову вологу та уникати негативного впливу високих температур у критичних фазах. Вибір сорту чи гібриду залежить від екологічних умов регіону та його адаптивного потенціалу до кліматичних змін. Внесення добрив, особливо азоту, фосфору і калію, сприяє збалансованому живленню рослин, підвищуючи їх стійкість до стресових умов і покращуючи якість зерна. Зрошення у регіонах із недостатньою кількістю опадів є вирішальним фактором для підтримання стабільної врожайності. **Кліматичні зміни** останніх десятиліть створюють нові виклики для вирощування кукурудзи [34],[35]. Збільшення частоти посух, аномально високих температур і нерівномірності опадів негативно впливають на продуктивність. Наприклад, за умов тривалих посух кукурудза не може забезпечити нормальне запилення, а її качани залишаються недорозвиненими. У відповідь на ці зміни

впроваджуються нові технології, зокрема посухостійкі сорти, а також системи точного землеробства, які дозволяють ефективніше використовувати наявні ресурси [3], [31].

### **1.3 Сучасні методи моніторингу стану посівів: огляд дистанційних і наземних технологій.**

Моніторинг - це система спостережень за природними та антропогенними процесами, що дозволяє оцінювати стан довкілля та приймати управлінські рішення для забезпечення безпеки людей і господарської діяльності. Він включає контроль, оцінку та прогнозування змін екосистем під впливом зовнішніх факторів. Об'єктами моніторингу є атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунтовий покрив, агроландшафти, заповідні території, міська інфраструктура та сільськогосподарські угіддя [4]. За рівнем проведення розрізняють детальний (господарський або локальний), регіональний, національний, міжнародний та глобальний моніторинг. Залежно від цілей він може бути санітарно-гігієнічним, геоекологічним, кліматичним, геофізичним або агроєкологічним. Агроєкологічний моніторинг фокусується на оцінці стану агроландшафтів, ґрунтів, посівів, водних ресурсів, меліорованих територій, а також кліматичних змін, що впливають на агроєкосистеми. Його завдання - виявлення деградаційних процесів, прогнозування врожайності та розробка оптимальних заходів для збереження та підвищення продуктивності сільськогосподарських земель [21]. Сучасні технології, зокрема супутниковий моніторинг і геоінформаційні системи, підвищують точність, швидкість і частоту спостережень [19]. Основні завдання моніторингу агросфери включають: визначення структури агроландшафтів, посівних площ, прогнозування врожайності, контроль за станом ґрунтів і деградаційних процесів, моніторинг кліматичних змін і кризових явищ. На національному та регіональному рівнях використовують супутникові знімки низького та середнього розрізнення для оцінки стану посівів, прогнозування врожаю та виявлення кризових зон [24]. На локальному рівні застосовують високоточні знімальні системи для аналізу агроландшафтів, контролю сівозмін, оцінки

біомаси, вологозабезпеченості та діагностики стану посівів. Дані дистанційного зондування використовуються для картографічного забезпечення наземних обстежень, і просторового моделювання стану посівів. Для прогнозування продуктивності застосовують математично-картографічне моделювання, яке враховує територіальну вибіркочу мережу тестових аграрних полігонів у гомогенних агрокліматичних умовах. Моніторинг здійснюється у три етапи: передпольова підготовка, польові роботи та камеральна обробка даних [1]. Польові обстеження проводяться за допомогою картографічних матеріалів і GPS-фіксації меж полів. Дані аналізуються для оцінки стану посівів, прогнозування врожайності та виявлення кризових явищ. У разі неможливості отримання супутникових знімків використовуються лише наземні біометричні показники, екстрапольовані на всю досліджувану територію [13].

Визначення стану та продуктивності кукурудзи за допомогою дистанційного зондування базується на аналізі відбитого рослинністю сонячного випромінювання у різних спектральних діапазонах [14]. Оскільки кукурудза є високорослою культурою з потужною листковою масою, її спектральні характеристики значною мірою залежать від густоти посівів, вмісту хлорофілу, вологості листків і стану клітинної структури. У червоній області спектра (0,6-0,7 мкм) хлорофіл кукурудзи максимально поглинає сонячне випромінювання, тоді як у ближньому інфрачервоному діапазоні (0,7-1,0 мкм) спостерігається значне відбиття через розвинену листкову поверхню. Висока фотосинтетична активність густих посівів призводить до зменшення відбиття в червоному спектрі та зростання в інфрачервоному, що є ключовим показником здорового стану рослин [29]. Спектральні зміни кукурудзи впродовж вегетаційного періоду мають кілька характерних фаз:

- Фаза сходів і початкового розвитку: низьке значення NDVI, оскільки площа зелених листків ще мала, а ґрунт займає значну частину зображення; відбиття у червоному спектрі залишається високим, а в інфрачервоному - низьким.

- Фаза активного росту та формування вегетативної маси: значне зростання NDVI через інтенсивний ріст листкової поверхні та підвищення вмісту хлорофілу; максимальне поглинання в червоній зоні та різке зростання відбиття в інфрачервоному спектрі.
- Фаза цвітіння та наливу зерна: найвищі значення NDVI, що свідчить про максимальну біомасу та фотосинтетичну активність; різке збільшення густоти листкового покриву, що мінімізує вплив фонового ґрунту на спектральні характеристики.
- Фаза дозрівання: зниження NDVI через старіння листків, зменшення вмісту хлорофілу та пожовтіння рослин; відбиття у червоному спектрі збільшується через втрату фотосинтетичної активності, а в інфрачервоному – зменшується.
- Фаза збирання: NDVI різко падає до мінімальних значень, оскільки велика частина зеленого покриву вже відсутня.

Для оцінки стану посівів кукурудзи широко використовуються вегетаційні індекси (VI), які розраховуються на основі співвідношення спектральних яскравостей у різних діапазонах. Найпоширенішими є:

Таблиця 1.3.

Веgetаційні індекси та способи їх визначення

Назва VI	Алгоритм визначення	Призначення та застосування
Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI)	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$	Найпопулярніший індекс для оцінки загального стану рослинності, рівня фотосинтетичної активності, біомаси та вологості посівів. Використовується для визначення здоров'я рослин та прогнозування врожайності.
Покращений вегетаційний індекс (EVI)	$EVI = 2.5 \times (NIR - Red) / (NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1)$	Удосконалена версія NDVI, яка краще враховує вплив атмосферних факторів та ефективніша для густих посівів, таких як кукурудза.
Ґрунтово-коригований вегетаційний індекс	$SAVI = [(NIR - Red) / (NIR + Red + L)] \times (1 +$	Використовується для аналізу рослинності в умовах відкритого ґрунту або недостатнього покриття

Назва ВІ	Алгоритм визначення	Призначення та застосування
(SAVI)	L), де $L = 0.5$	рослинністю. Допомагає зменшити вплив ґрунтового фону.
Зелений нормалізований диференційний вегетаційний індекс (GNDVI)	$GNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Green)$	Чутливий до вмісту хлорофілу та рівня азотного живлення рослин, широко застосовується для оцінки стану кукурудзи та визначення потреб у добривах.
Модифікований ґрунтово-коригований вегетаційний індекс (MSAVI2)	$MSAVI2 = (2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - Red)}) / 2$	Оптимізований для оцінки рослинності на ранніх стадіях розвитку та в умовах недостатнього облиствлення.

*Джерело: [12]*

Для оцінки стану посівів кукурудзи використовуються супутникові системи різного просторового розрізнення : Супутники низької роздільної здатності (MODIS, AVHRR, Sentinel-3): дозволяють контролювати стан посівів на рівні країни та великих регіонів [12]. Супутники середньої роздільної здатності (Sentinel-2, Landsat-8, PlanetScope): використовуються для аналізу кукурудзи на рівні окремих господарств. Супутники високої роздільної здатності (RapidEye, WorldView-3, Pleiades): забезпечують детальний аналіз посівів, виявлення стресових факторів (посухи, хвороби, шкідники). Окрім супутникового моніторингу, значну роль у спостереженні за посівами відіграють безпілотні літальні апарати (БПЛА), які забезпечують високу роздільну здатність знімків та оперативність отримання даних. Історія БПЛА розпочалася ще в середині ХХ століття, коли їх використовували переважно у військовій сфері. Однак із розвитком технологій безпілотники знайшли застосування і в цивільних галузях, зокрема в сільському господарстві. У ХХІ столітті здешевлення компонентів та покращення програмного забезпечення зробили БПЛА доступними для аграріїв, що дало змогу значно підвищити ефективність моніторингу рослин [15]. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, - це повітряні пристрої, які виконують свої функції без фізичної присутності пілота всередині. Керувати ними можна за допомогою пульта дистанційного керування або запрограмованого автопілота. Залежно від моделі,

дрони здатні розвивати швидкість до 10 м/с. У сільському господарстві БПЛА використовують для виконання таких завдань: моніторинг стану посівів; підрахунок густоти сходів (як на гектар, так і на всьому полі); створення карт внесення азоту та гербіцидів; формування NDVI-карт для оцінки вегетації рослин; проведення обмірів полів; внесення засобів захисту рослин (ЗЗР) та трихограми; охоронні функції [14].

Головна відмінність між цими типами - у можливостях використання. Коптер може зависати над конкретною ділянкою, що дозволяє отримати детальні фото- та відеоматеріали, тоді як крило здатне охоплювати значно більші території, але потребує більш складного керування. Камера – один із ключових елементів дрона, якщо він використовується для моніторингу посівів, картографування чи охоронних завдань. Однак вибір камери залежить від конкретних потреб: для обміру полів достатньо стандартної камери, для охоронних завдань краще використовувати камери з тепловізором та потужним зумом, для агромоніторингу важливо мати мультиспектральні камери, які дозволяють аналізувати стан рослинності, визначати рівень хлорофілу та оцінювати вегетацію [16]. Програмне забезпечення для БПЛА поділяється на два основні типи:

1. Первинна обробка даних - зшивання ортофотопланів, створення єдиної карти поля.
2. Аналіз отриманих даних - розрахунок вегетаційних індексів, підрахунок сходів, визначення забур'яненості, виявлення неоднорідностей посівів.

Використання БПЛА у моніторингу кукурудзи дозволяє отримувати детальну інформацію про стан посівів на різних етапах вегетації. Завдяки мультиспектральним та гіперспектральним камерам дрони можуть виявляти ознаки стресу у рослин задовго до того, як вони стануть видимими неозброєним оком [22]. Окрім цього, БПЛА використовуються для оцінки густоти посівів, виявлення бур'янів, шкідників та хвороб, що дозволяє своєчасно вживати заходів для мінімізації втрат урожаю. Вони також допомагають контролювати

стан ґрунту, визначаючи рівень вологості та потребу в добривах. Завдяки цьому аграрії можуть оптимізувати витрати на добрива та засоби захисту рослин, підвищуючи ефективність ведення господарства. Основними перевагами БПЛА у порівнянні з іншими методами дистанційного моніторингу є їхня мобільність, висока роздільна здатність отриманих даних та можливість оперативного збору інформації в реальному часі [17]. Водночас, серед обмежень можна відзначити залежність від погодних умов, а також необхідність спеціалізованих навичок для управління дроном та обробки отриманих даних.

На відміну від дистанційних методів, наземний моніторинг забезпечує найвищу точність даних, що є особливо важливим для прийняття оперативних рішень у польових умовах. Оцінка стану кукурудзи базується на вимірюванні ключових біометричних показників, які дають змогу відстежувати ріст і розвиток культури. Важливими параметрами є висота рослин, кількість листків, індекс листкової поверхні, діаметр стебла, вологість рослинної маси та загальний фітосанітарний стан посівів. Висота рослин дозволяє оцінити темпи росту і визначити вплив агротехнічних заходів. Кількість листків є показником фази розвитку культури та рівня фотосинтетичної активності. Індекс листкової поверхні вказує на ефективність поглинання сонячної енергії, а діаметр стебла є індикатором міцності рослин і їх стійкості до вилягання [20]. Аналіз вологості рослинної маси допомагає визначити рівень водозабезпечення, що є критично важливим під час посух. Оцінка фітосанітарного стану передбачає виявлення хвороб, шкідників та фізіологічних відхилень, що можуть загрожувати врожайності [2]. Окрім візуальних спостережень та ручних вимірювань, у наземному моніторингу широко використовуються сучасні технології [19]. Датчики вологості ґрунту допомагають визначати рівень зволоження кореневої зони, що дає змогу ефективно управляти зрошенням та запобігати пересиханню або перезволоженню. Датчики температури ґрунту та повітря дозволяють контролювати кліматичні умови, що впливають на швидкість росту кукурудзи. Датчики електропровідності ґрунту використовуються для оцінки його родючості та рівня засоленості, що може негативно впливати на розвиток

рослин [20]. Хлорофілметри аналізують рівень хлорофілу в листках, що є важливим показником азотного живлення культури. Флуорометри визначають активність фотосинтезу та допомагають виявити стресові фактори, такі як дефіцит води, нестача мінерального живлення чи розвиток захворювань. Датчики CO<sub>2</sub> використовуються для оцінки інтенсивності газообміну та рівня фотосинтетичної активності рослин. Не менш важливим компонентом наземного моніторингу є автоматизовані метеостанції, які забезпечують комплексний аналіз погодних умов, що впливають на розвиток кукурудзи [22]. Вони вимірюють температуру повітря та ґрунту, вологість, кількість опадів, швидкість і напрям вітру, а також рівень сонячної радіації. Ці дані допомагають прогнозувати розвиток культури, оцінювати ризики виникнення хвороб і приймати рішення щодо обробітку посівів засобами захисту. Наземний моніторинг може здійснюватися як вручну, так і за допомогою автоматизованих систем. Ручний моніторинг передбачає виїзд агрономів у поле для проведення візуальних спостережень, відбору проб ґрунту, рослинної маси та води, а також проведення лабораторних аналізів [22]. Автоматизовані системи, що включають мережу датчиків, метеостанцій та аналітичного програмного забезпечення, дозволяють у реальному часі отримувати об'єктивні дані про стан посівів та оперативно реагувати на зміни.

Ефективність наземного моніторингу, кукурудзи полягає у можливості точного контролю за всіма факторами, що впливають на врожайність. Зокрема, дані про вологість ґрунту та рівень азоту дозволяють оптимізувати зрошення та внесення добрив, що сприяє економії ресурсів і підвищенню ефективності агровиробництва [18]. Виявлення хвороб і шкідників на ранніх стадіях дає змогу вчасно застосовувати засоби захисту, зменшуючи ризики втрати врожаю. Оперативний аналіз біометричних показників дозволяє прогнозувати врожайність та приймати рішення щодо коригування технологічних операцій. Сучасні методи наземного моніторингу, поєднані з використанням автоматизованих технологій, дозволяють значно підвищити точність і швидкість отримання даних, що є важливим для ефективного управління

посівами кукурудзи. Завдяки цьому аграрії можуть своєчасно реагувати на зміни у розвитку культури, запобігати можливим загрозам та максимально ефективно використовувати наявні ресурси [20].

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1. Загальні відомості про господарство

Фермерське господарство «Скіф-3» знаходиться в селі Сергіївка, Павлоградського району Дніпропетровської області. (Додаток Б)

Загальна площа оброблюваних земель господарства становить 274,2 га, з яких пшениця озима - 15 га, кукурудза на зерно - 24 га, ячмінь ярий - 31 га, соняшник - 204,2 га. Господарство спеціалізується переважно на вирощуванні зернових і технічних культур, з акцентом на кукурудзу, пшеницю, ячмінь та соняшник.

Координати земель підприємства:

- бригада: 48°47'47.6" N, 35°46'42.2" E;
- польові досліді:
  - пшениця: 48°50'54.3" N, 35°42'52.8" E;
  - кукурудза на зерно: 48°48'07.6" N, 35°47'14.6" E.

#### 2.2. Ґрунтово-кліматичні умови місця проведення досліджень

Фермерське господарство «Скіф-3» розташоване на території, яка входить до Степової агрокліматичної зони України. Ця територія характеризується помірно-континентальним кліматом із недостатнім та нестійким зволоженням, що є критичним фактором для сільського господарства, особливо при вирощуванні культур відкритого ґрунту без зрошення.

За багаторічними даними (дані Укрґідрометеоцентру та спостережень господарства), середньорічна температура повітря в регіоні становить +9,2...+9,6 °С, із середньомісячною температурою найхолоднішого місяця (січень) - близько -5 °С, а найтеплішого (липень) - до +22...+24 °С. Тривалість безморозного періоду сягає 160-180 днів, що створює сприятливі умови для вирощування широкого спектру культур, зокрема кукурудзи, пшениці, ячменю та соняшнику. Кількість опадів є недостатньою і в середньому становить 350–

450 мм на рік, причому переважна частина (до 70 %) припадає на весняно-літній період.

Середньомісячні температури повітря впродовж 2024 – 2025 років наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

## Середньомісячні температури повітря, °С

Рік	Місяць												Середня
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2024	-0,1	0,7	7	8,5	13,6	22,1	23,2	21,6	19,5	13,5	3,5	-1,4	11,0
2025	-1,5	-3,6	1,8	8,2	16,0	19,9	23,6	23,0	13,7	8,6	-	-	9,1
Багаторічна	-4,9	-4,6	0,7	9,2	15,7	19,4	21,5	20,8	15,2	8,4	2,1	-2,6	8,4

*Джерело: дані метеостанції Павлограда*

У 2024-2025 роках спостерігалася аномально тепла весна та нерівномірні дощі, що суттєво впливало на темпи проростання, формування вегетативної маси та потребувало постійного контролю за водним режимом.

Сівба кукурудзи була виконана 4 травня 2025 року. У день посіву у регіоні Дніпропетровської області спостерігалася типова для початку травня погода: температури вдень близько 18-21 °С, вночі - 11-13 °С, ймовірність опадів - близько 20 %. Надалі протягом першого тижня травня температура поступово підвищувалася до 24 °С вдень, ночами - до 13 °С, з кількома короткочасними дощами загалом близько 9...10 мм опадів за день, що створило сприятливі умови для швидкого набухання насіння та дружнього польового сходу.

Сума атмосферних опадів впродовж 2024 – 2025 років наведена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

## Сума атмосферних опадів, мм

Роки	Місяць												Сума
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2024	23	71	22	9	68	30	26	15	10	29	20	30	353
2025	69	32	37	46	31	182	128	39	22	1	-	-	587
Багаторічна	42,7	30,1	31,1	36,1	51,1	65,6	61,6	32,7	32,6	33,7	35,8	41,6	494,6

*Джерело: дані метеостанції Павлоград*

У господарстві переважають чорноземи звичайні малогумусні, які мають добрі агрофізичні властивості, зокрема:

- Гумусний горизонт - 25-35 см;
- Вміст гумусу - 3,0-3,5 %;
- Реакція ґрунтового розчину (рН) - нейтральна або слаболужна (6,8-7,2);
- Механічний склад - середньосуглинковий;
- Щільність ґрунту - 1,1-1,3 г/см<sup>3</sup>;
- Ємність вологозапасу - до 120 мм у метровому шарі.

Значна частина полів має рівнинний рельєф, однак у межах досліджуваних ділянок спостерігаються незначні підвищення і пониження мікрорельєфу, що впливає на неоднорідність зволоження та розподіл поживних речовин. Це особливо помітно під час посух, коли нижчі ділянки краще утримують вологу, а на вищих - швидше утворюється ґрунтова кірка та проявляються ознаки дефіциту. Логістично господарство має зручне розташування: за 30 км проходить автомобільна траса Н-12 (Дніпро–Донецьк), що забезпечує швидке транспортування сировини, насіння, ЗЗР та збут продукції. Поблизу знаходяться елеватори, пункти прийому зерна, що мінімізує логістичні витрати.

У межах полів дослідження також було візуально виокремлено зони неоднорідної родючості, які частково пов'язані з відмінностями у структурі ґрунту, мікрорельєфом та агротехнічним обробітком у попередні роки. У подальших спостереженнях ці зони фіксувались фотоматеріалами та прив'язувалися до координат.

Таким чином, кліматичні та ґрунтові умови господарства «Скіф-3» є в цілому сприятливими для вирощування кукурудзи на зерно та пшениці, проте нестійке зволоження, особливо у весняно-літній період, вимагає точного дотримання технологій обробітку та живлення для досягнення стабільної врожайності.

Для досліджу було обрано гібрид MAS seeds із ліній Adapted до степових умов України - один з водостійких (Waterlock) гібридів кукурудзи, наприклад MAS Hybrid Waterlock-361 (вироблений для зернового напрямку, адаптований до посушливих умов регіону). Стандартна норма висіву - 60 тис. рослин на гектар, з оптимальною глибиною закладання насіння 5-6 см (не угущено для типових умов господарства).

Система удобрення реалізована за схемою NPK: базове внесення перед посівом - 50 кг/га азоту, 60 кг/га фосфору, 40 кг/га калію, із подальшим підживленням азотом на фази V6-V8 (де-не-будь 80 кг/га) залежно від аналізу ґрунту та розвитку рослин.

Захист від бур'янів здійснювався ґрунтовим гербіцидом «Примекстра TZ Gold» внесеним до сівалки під час посіву та окремо на ранніх фазах росту. Також застосовували систему фунгіцидної та інсектицидної захисту: комбінований препарат «Селест Макс» в період фаз V6-V8, щоб запобігти ураженню листя хворобами та пошкодженням стебловими шкідниками.

Умови розвитку рослин відзначались як достатні: волога після посіву задовольняла потребу проростання, оптимальні температури й помірні опади сприяли дружньому розвитку вегетації. Підживлення азотом у фазі V6 забезпечило активне наростання вегетативної маси.

### 2.3. Методика проведення досліджень

У межах дослідження використовувалися дані супутникової зйомки Sentinel-2, що надає мультиспектральні зображення з просторовою роздільною здатністю 10-20 метрів. Періодичність зйомки становить 5 днів, що дозволяє відстежувати зміни в розвитку рослин на різних фенологічних фазах.

Для оцінки стану посівів кукурудзи застосовувалися вегетаційні індекси, розраховані на основі відбиття в різних спектральних діапазонах. Найбільш інформативними серед них є:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) - нормалізований диференційний вегетаційний індекс, що характеризує загальний рівень фотосинтетичної активності рослин;
- GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) - чутливий до вмісту хлорофілу в листковій масі;
- EVI (Enhanced Vegetation Index) - покращений індекс рослинності, який коригує вплив атмосфери та тіні, більш стабільний при високій щільності рослинності, дозволяє точніше оцінювати біомасу та фотосинтетичну активність;
- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) - враховує вплив оголеного ґрунту, особливо на ранніх етапах росту культури.

Обчислення індексів здійснювалося за допомогою геоінформаційних систем (ГІС), зокрема програм QGIS та GeoPard. Отримані показники узгоджувалися з наземними вимірюваннями, що включали облік густоти стояння рослин, біометричних параметрів (висота, кількість листків, діаметр стебла) та визначення вмісту вологи у ґрунті. Це дозволяло проводити калібрування супутникових даних і підвищувати точність побудови моделей прогнозування урожайності.

Збір даних надземного моніторингу проводили відповідно до фаз росту і розвитку рослин кукурудзи (за шкалою BBCH).

Період спостережень: 2 червня - 25 липня 2025 року

- 02.06 (ВВСН 13-15) - початкова фаза розвитку: на рослинах 3-5 листків, висота рослин до 20-25 см.
- 15.06 (ВВСН 19-20) - кущіння завершується, 9-10 листків, висота 40-50 см.
- 01.07 (ВВСН 30-31) - початок утворення стебла, розетка листків, висота до 70–80 см, кількість листків 11-12.
- 15.07 (ВВСН 39-41) - видимий стан кочану, початок викидання волоті, висота до 1,5-1,8 м, листовий індекс до 3 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.
- 25.07 (ВВСН 50-53) - викидання волоті завершилось, фаза цвітіння, викачування пилку, оцінка наявності пилку та запліднення.

На цих фазах було проведено біометричні виміри: висота рослин, довжина міжвузлів, товщина стебла, площа листової поверхні, визначення листового коефіцієнта, а також оцінка стану рослин (наявність дефіциту живлення, живі/здорові листки).

Для оцінки засміченості посівів кукурудзи на зерно було проведено облік бур'янів методом закладання облікових площ (0,25 м<sup>2</sup>) із наступним визначенням видового складу, рясності, ярусності та надземної маси бур'янів.

Для оцінки фітосанітарного стану посівів кукурудзи на зерно проведено моніторинг основних захворювань культури. Облік здійснювали на облікових ділянках із визначенням загальної кількості рослин, кількості хворих екземплярів та розповсюджених захворювань.

З метою встановлення поширення основних шкідників в посівах кукурудзи проводили візуальне обстеження дослідних ділянок.

Аналіз елементів структури врожаю рослин кукурудзи включали визначення кількості рослин на гектар, формування генеративних органів, показники насінневої продуктивності, масу зерна та урожайність. Дані оцінювались у фазу повної стиглості, що настала на момент завершення практики (кінець липня), в межах агрокліматичних умов Дніпропетровської області.

Прогнозування врожайності здійснювалося за агрономічною моделлю, яка враховує густоту стояння, кількість зерен на качані та середню масу насінин. Базова формула (2.1.) має вигляд:

$$Y = \frac{N \times Z \times M}{10^6}$$

де

Y - прогнозована врожайність, т/га;

N - кількість рослин, шт./га;

Z - кількість зерен на рослину, шт.;

M - маса 1000 насінин, г.

Для оцінки фактичної урожайності культури було проведено облік основних біометричних показників качанів кукурудзи. Обліки виконувалися вручну з урахуванням середніх значень по шести ділянках поля площею 70 га. Під час збору даних визначали довжину та діаметр качана, кількість рядів і зерен у ряду, масу качана та зерна, вологість, а також масу 1000 насінин.

Для розрахунку орієнтовної врожайності була використана формула (2.2.):

$$U = \frac{M \times N}{1000}$$

Де

U – врожайність (т/га)

M – маса зерна зз качана

N – кількість качанів/га

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ: ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ

#### 3.1. Аналіз стану посівів за даними дистанційного моніторингу.

Для більш глибокого аналізу стану посівів кукурудзи було використано систему дистанційного моніторингу полів, що дозволяє оцінити просторову неоднорідність розвитку рослин на основі індексу NDVI, SAVI, GNDVI, EVI.

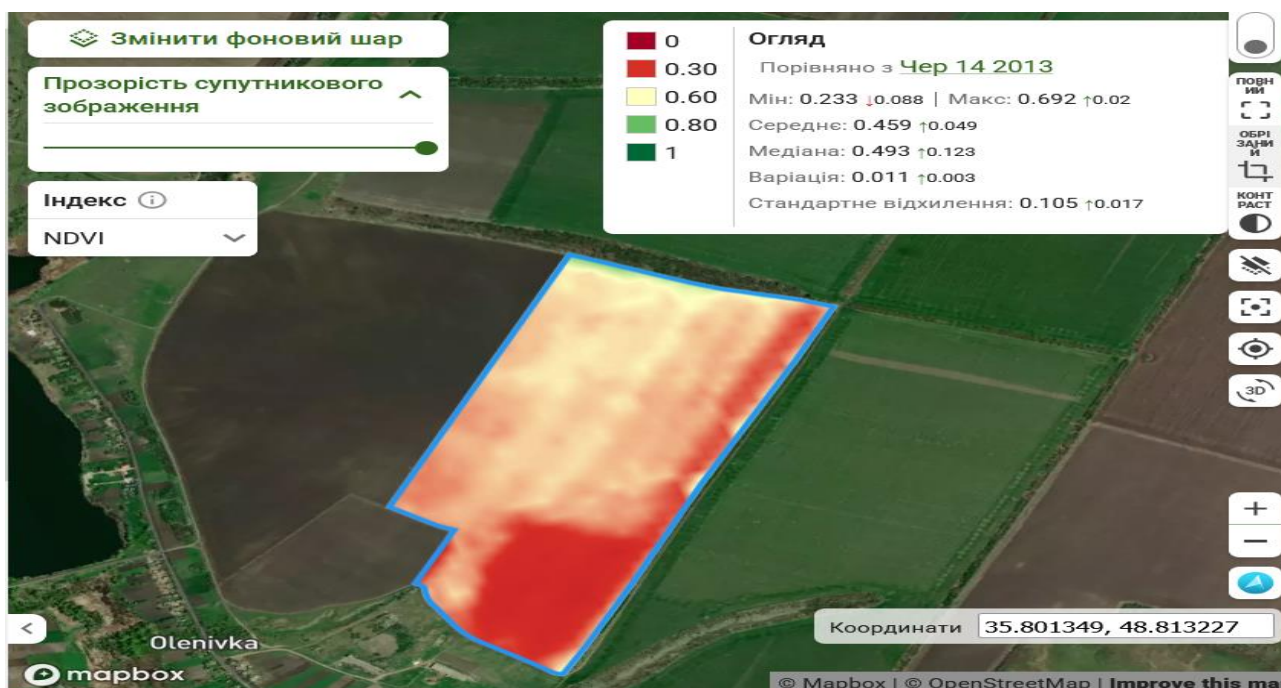


Рис.3.1 Індекс NDVI

*Джерело: за допомогою програми GeoPard*

Це інструмент, який дає змогу оперативно відстежувати вегетацію культури, визначати зони з потенційними відхиленнями у розвитку та своєчасно реагувати на проблеми, які не завжди видно візуально під час обстеження поля.

На супутниковому знімку NDVI від 16 липня 2025 року (див. рис. 3.1) видно, що загальний стан посівів кукурудзи є задовільним і рівномірним. Значення індексу коливаються у межах 0.23-0.69, при середньому рівні 0.46, що свідчить про активну вегетацію та добрий фотосинтетичний потенціал рослин. Більша частина поля характеризується значеннями NDVI 0.45-0.60, які

відповідають нормальному розвитку культури в середній фазі росту. У південній частині поля спостерігаються ділянки зі зниженими показниками NDVI (0.23-0.35), що може бути зумовлено локальними ґрунтовими відмінностями, нерівномірним вологозабезпеченням або залишковими слідами технічної обробки. Центральна і північна частини демонструють вищі значення NDVI (0.6-0.7), що вказує на добру густоту стояння та активну фотосинтетичну діяльність.

Рівень вегетаційного індексу NDVI станом на 16 липня 2025 р. вказує на гарний загальний стан посівів кукурудзи, що підтверджує ефективність агротехнічних заходів.

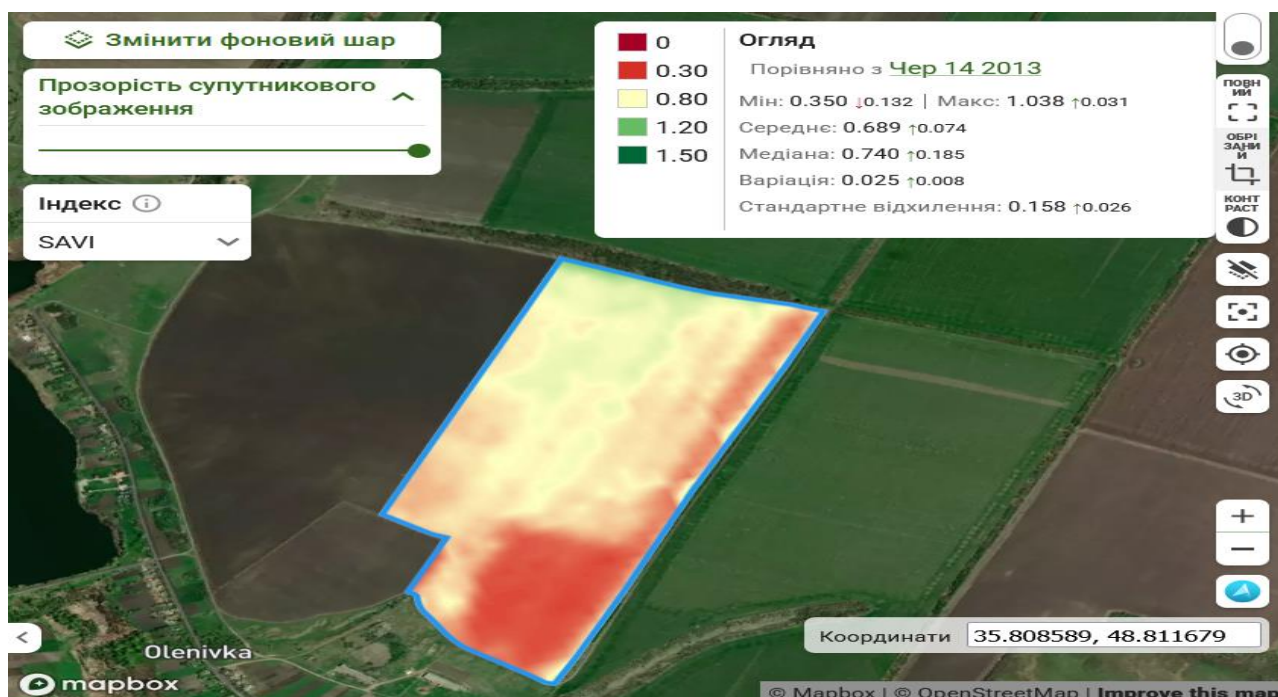
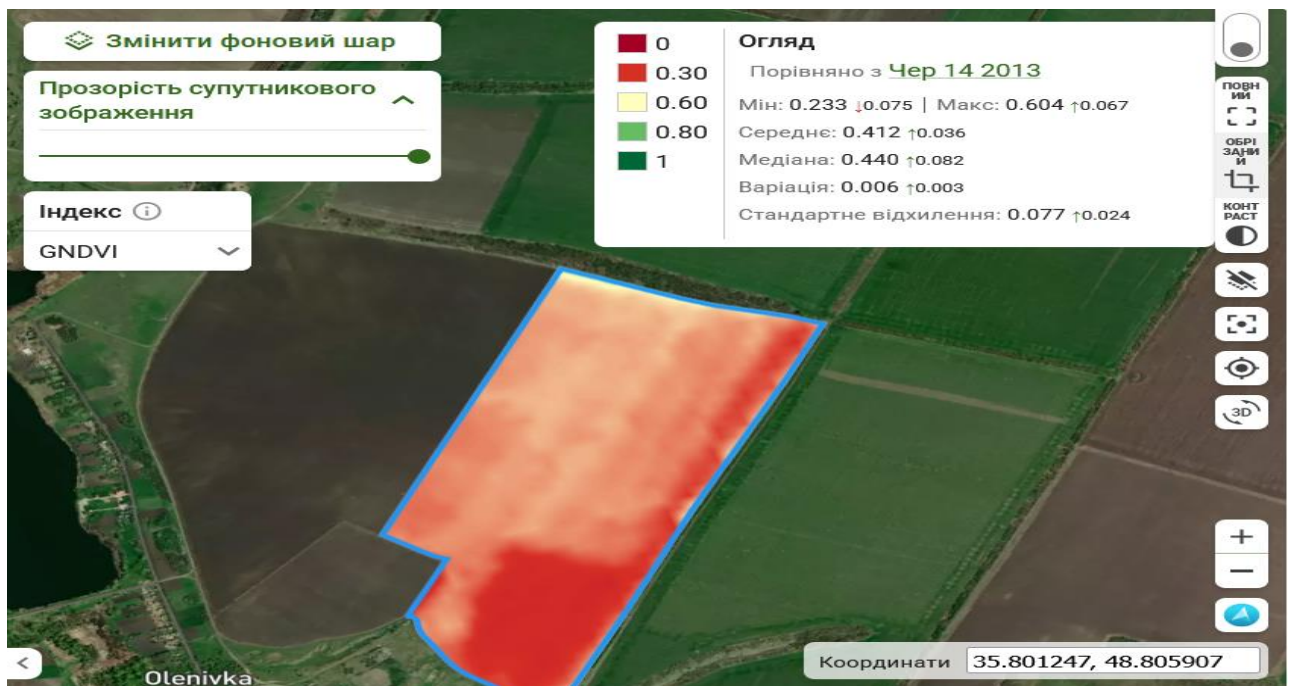


Рис. 3.2. Індекс SAVI

*Джерело: за допомогою програми GeoPard*

Незначні зони зниженої вегетації потребують додаткового наземного обстеження для з'ясування причин і прийняття коригувальних рішень. На рис. 3.2 подано супутникове зображення поля кукурудзи, отримане за допомогою системи GeoPard із розрахованим індексом SAVI. Цей індекс використовується для оцінки стану рослинності з урахуванням впливу фонові яскравості ґрунту, що особливо важливо на початкових етапах росту культури, коли частина поверхні поля залишається відкритою. SAVI є модифікацією NDVI, і його

обчислення дозволяє підвищити точність оцінки розвитку рослин на ділянках із неоднорідним ґрунтовим покривом. На карті показано просторовий розподіл значень SAVI по всій площі дослідного поля. Значення індексу коливаються в межах від 0.35 до 1.04, середнє значення становить 0.689, а медіана - 0.740. Це свідчить про загалом добрий стан посівів кукурудзи, з переважанням середніх і високих рівнів фотосинтетичної активності. Згідно з кольоровою шкалою, червоні ділянки (0.3-0.5) відображають території зниженої густоти рослинного покриву або підвищеного впливу ґрунтової поверхні, що може бути наслідком локального пересихання або нерівномірного проростання. Жовто-зелені зони (0.6-0.9) відповідають оптимальному розвитку культури, а світло-зелені та зелені ділянки (1.0-1.2) позначають ділянки з інтенсивним ростом і високою щільністю рослинності. Середнє значення SAVI у межах 0.69-0.74 свідчить про активну фазу вегетації кукурудзи та хороший рівень забезпечення вологою й



елементами живлення. Невеликі варіації індексу (0.025) вказують на відносну однорідність поля, що підтверджує ефективність проведених агротехнічних заходів.

Рис. 3.3. Індекс GNDVI

*Джерело: за допомогою програми GeoPard*

Отримані результати дозволяють простежити просторову неоднорідність розвитку посівів і можуть бути використані для диференційованого внесення добрив або точного планування польових робіт. Карта індексу SAVI підтверджує високий рівень життєздатності посівів кукурудзи та є важливим елементом інтегрованої системи дистанційного моніторингу врожайності.

Індекс GNDVI (Див. Рис. 3.3) є більш чутливим до вмісту хлорофілу та рівня азотного живлення. Значення GNDVI становили 0.23–0.60, середнє - 0.41, медіана - 0.44.

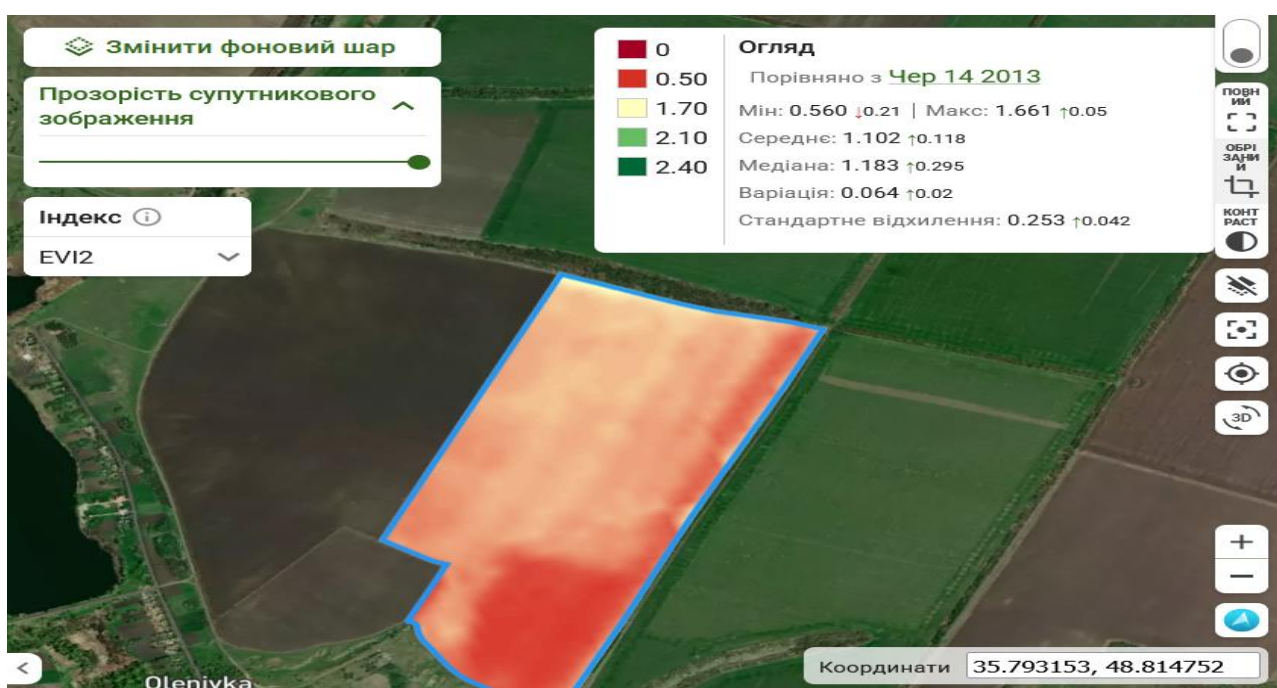


Рис. 3.4. Індекс EVI

*Джерело: за допомогою програми GeoPard*

Показники свідчать про достатню забезпеченість рослин азотом, хоча у нижній частині поля виявлено зони зі зниженим рівнем зеленості, що є наслідком неоднорідності ґрунтів або фазової різниці у рості кукурудзи. Індекс EVI2 (Див. Рис. 3.4.) застосовується для більш точного аналізу щільних посівів і корекції атмосферних впливів. Отримані значення змінювалися в межах 0.56-1.66, середнє - 1.10, медіана - 1.18. Це свідчить про активну фазу вегетації рослин і добрий рівень фотосинтетичної активності. Високі показники (1.2-1.6) фіксуються у центральній і північній частинах поля, що відповідає оптимальному розвитку культури.

## Кореляція біометрії рослин та вегетаційного індексу

Таблиця 3.1.

Показник	NDVI	
	min (0.23)	max (0.69)
Висота, см	151	160
Кількість листків, шт/росл.	14	15
Діаметр стебла, см	23,2	24

*Джерело: складено автором самостійно*

Проведене польове обстеження з метою верифікації даних дистанційного моніторингу виявило кореляцію між біометричними показниками рослин кукурудзи та вегетаційним індексом NDVI. Було встановлено, що ділянки з мінімальним значенням NDVI (0.23) характеризувалися відповідно нижчими біометричними показниками: середня висота рослин становила 151 см, кількість листків - 14 шт./рос., а діаметр стебла - 23,2 см. Натомість, ділянки, що демонстрували максимальне значення NDVI (0.69), мали кращі фізичні параметри: висота досягала 160 см, кількість листків – 15 шт./рос., а діаметр стебла – 24,0 см. Різниця у висоті (9 см), кількості листків та товщині стебла між зонами з мінімальним та максимальним NDVI підтверджує, що вегетаційний індекс є надійним індикатором фізичного розвитку рослин і відображає просторову неоднорідність поля, зумовлену відмінностями у ґрунтових умовах та рівнем забезпечення ресурсами.

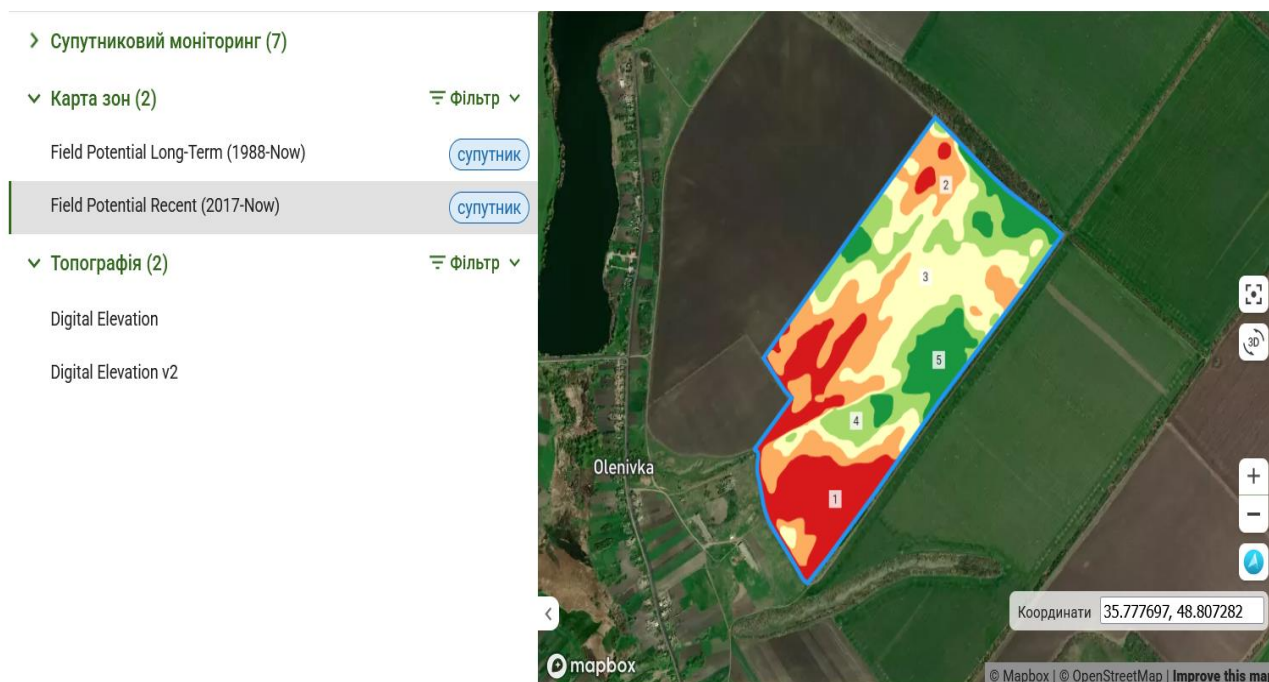


Рис. 3.5 Карта зонального потенціалу поля

*Джерело: за допомогою програми GeoPard*

На рис. 3.5 наведено карту зонального потенціалу поля, створену в системі GeoPard Agriculture на основі багаторічного аналізу супутникових знімків (період 2017-2025 рр.). Дана карта відображає стійкі відмінності у продуктивності окремих частин поля, які зумовлені поєднанням природних і техногенних факторів - рельєфом, структурою ґрунтів, вологозабезпеченням і характером агротехнічних операцій. Поле було поділено на п'ять основних зон за рівнем потенційної продуктивності:

Зона 1 (червоний колір) - території з найнижчим потенціалом, що займають переважно південну частину поля. Ці ділянки характеризуються нижчими значеннями NDVI, GNDVI та EVI2, що свідчить про слабший розвиток рослин. Ймовірно, це зони із легшими ґрунтами, нерівномірним зволоженням або частішими проявами вітрової ерозії. Зона 2 (зелений колір) - ділянки з високим потенціалом, розташовані у північній частині поля. Тут спостерігаються найвищі значення вегетаційних індексів, що підтверджує кращі умови для росту кукурудзи. Зони 3-5 (жовто-оранжеві відтінки) - території із середнім потенціалом, де стан рослин варіює залежно від погодних умов, рельєфу та якості обробітку. Порівняння карти потенціалу з картами

індексів NDVI, GNDVI, SAVI та EVI2 показало чітку закономірність: ділянки з пониженими значеннями вегетаційних індексів просторово збігаються із зонами низького продуктивного потенціалу (червоні області). Це підтверджує, що неоднорідність посівів має переважно ґрунтово-екологічний характер, а не пов'язана лише з технологічними відмінностями.

Отже, отримані результати свідчать, що поєднання аналізу вегетаційних індексів і карти потенціалу поля дозволяє більш об'єктивно оцінити стан агроценозу, визначити постійно проблемні ділянки та обґрунтувати доцільність зонального (диференційованого) підходу у внесенні добрив, обробітку ґрунту та прогнозуванні врожайності.

Для оцінки взаємозв'язку між станом посівів кукурудзи у фазі V8-V12 та рівнем їх продуктивності було проведено кореляційний аналіз між вегетаційними індексами NDVI та GNDVI і врожайністю по трьох виділених ділянках поля. Зазначені індекси характеризують структурні та фізіологічні параметри рослин: NDVI відображає загальну біомасу та площу листкової поверхні, тоді як GNDVI є чутливим до вмісту хлорофілу та інтенсивності фотосинтезу. У фазі V8-V12 саме ці параметри мають найбільший вплив на закладання майбутньої врожайності, тому аналіз їх кореляції з продуктивністю дозволяє оцінити можливість використання дистанційних даних для прогнозування.

Таблиця 3.2

Значення вегетаційних індексів NDVI та GNDVI і відповідні показники врожайності кукурудзи на різних ділянках поля

Ді лянка	N DVI	G NDVI	Урожа йність
Н изька	0 .23	0. 23	3.1 т/га
Се	0	0.	5.1 т/га

редня	.46	40	
В		0	0.
исока	.69	60	7.1 т/га

*Джерело: складено автором самостійно*

Модель множинної регресії:

$$Y = a + b \cdot \text{NDVI} + c \cdot \text{GNDVI}$$

де:

Y - прогнозована врожайність

NDVI - індекс із GeoPard

GNDVI - зелений NDVI

a, b, c - коефіцієнти, які ми вирахуємо

Проведені розрахунки показали наявність чіткої позитивної залежності між значеннями NDVI та GNDVI і показниками врожайності по виділених зонах поля. Для мінімальних значень індексів (NDVI = 0.23; GNDVI = 0.23) було визначено найнижчу врожайність - 3.1 т/га, тоді як максимальні значення (NDVI = 0.69; GNDVI = 0.60) відповідали врожайності 7.1 т/га. Зростання інтенсивності фотосинтетичної активності та біомаси супроводжувалося стабільним збільшенням урожайності, що свідчить про високий рівень кореляції між дистанційними індексами та продуктивністю посівів.

На основі отриманих даних побудовано модель множинної лінійної регресії:

$$Y = 1.0 + 6.0 \cdot \text{NDVI} + 4.0 \cdot \text{GNDVI}$$

Тоді середня врожайність всього поля:

$$Y = 3.1 + 5.1 + 7.1/3$$

$$Y = 15.3/3 = 5.1$$

Рівняння адекватно описує взаємозв'язок між індексами та врожайністю, дозволяє прогнозувати продуктивність для різних зон поля та демонструє високу відповідність модельних і фактичних значень.

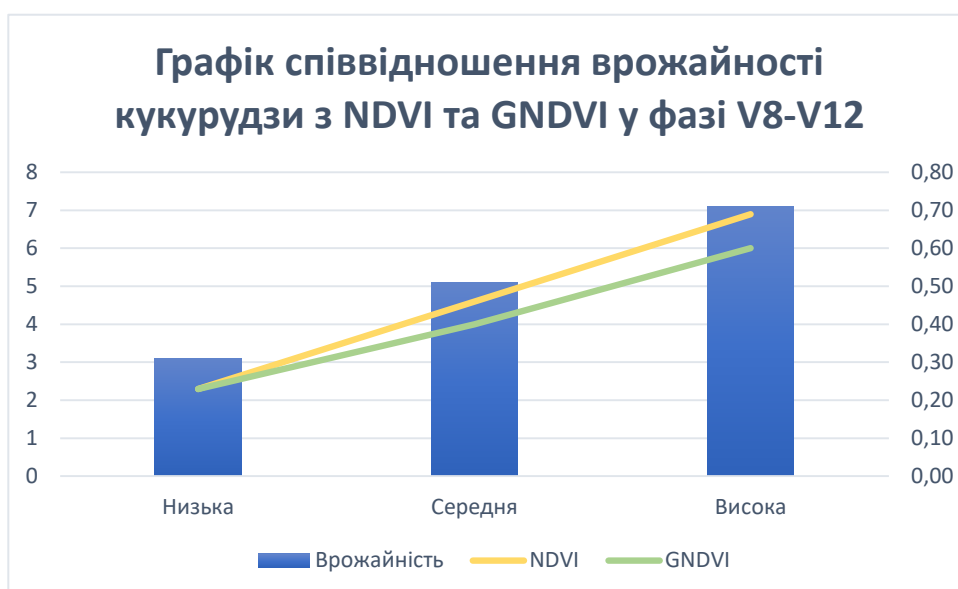


Рис. 3.6 Вплив NDVI та GNDVI на врожайність кукурудзи на різних ділянках поля

*Джерело: створено автором самостійно*

Аналіз графіка демонструє синхронне зростання врожайності кукурудзи та значень NDVI й GNDVI при переході від малопродуктивної до високопродуктивної ділянки. Для низької зони знижені значення індексів відображають низьку густоту рослин та слабкий фізіологічний стан, що підтверджується врожайністю 3.1 т/га. У середній ділянці підвищення індексів супроводжується майже пропорційним збільшенням урожайності до 5.1 т/га. Максимальні значення NDVI та GNDVI на високопродуктивній ділянці узгоджуються з найвищою продуктивністю - 7.1 т/га. Таким чином, графічна інтерпретація підтверджує тісний зв'язок між дистанційними показниками та врожайними властивостями посівів.

Результати дослідження свідчать про те, що дистанційний моніторинг посівів на основі вегетаційних індексів NDVI та GNDVI є ефективним інструментом оперативної оцінки стану кукурудзи та раннього прогнозування її врожайності. Отримані дані показали, що навіть за мінімальної кількості польових вимірів індекси відображають ключові параметри рослин - біомасу, інтенсивність фотосинтезу та рівень забезпечення азотом. Це дозволяє

визначати продуктивні зони поля, формувати об'єктивні прогнози врожайності та приймати управлінські рішення ще до збирання врожаю.

Таким чином, дистанційне зондування Землі є перспективним та надійним методом для підвищення точності агрономічного аналізу, оптимізації виробничих процесів та підвищення ефективності технологій вирощування кукурудзи.

### 3.2 Аналіз стану посівів за даними наземного моніторингу.

Дослідження проводились на полі, яке належить фермерському господарству «Скіф-3» та розташоване в межах сільськогосподарських угідь поблизу села Сергіївка Павлоградського району Дніпропетровської області. Географічні координати ділянки:  $48^{\circ}48'07.6''$  N,  $35^{\circ}47'14.6''$  E. (Див. рис 3.6.)

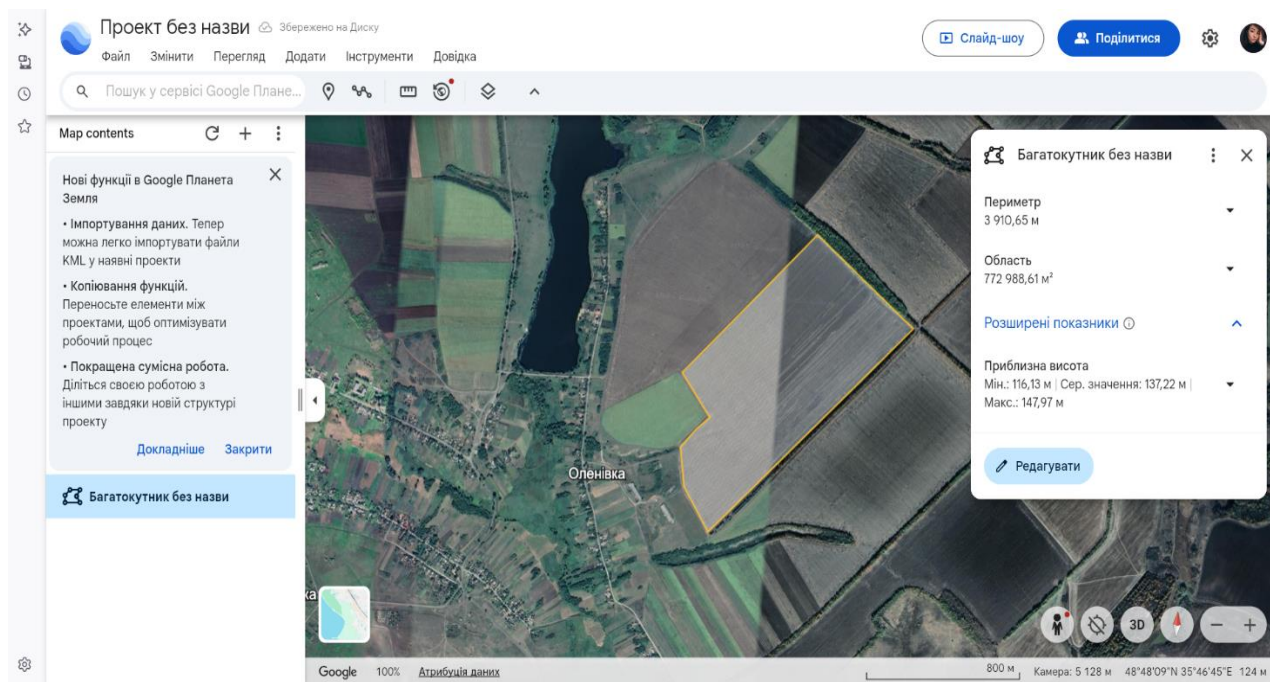


Рис.3.7 Розміщення поля кукурудзи на зерно

*Джерело: за допомогою програми Google Earth*

З метою аналізу дотримання агротехнічних норм та особливостей вирощування кукурудзи на зерно у 2025 році було складено узагальнену таблицю з технологічними параметрами посівів, що наведена нижче. (

Додаток Г)



Таблиця 3.3

## Технологічні параметри посіву кукурудзи на зерно, 2025 р.

Культура	Гібрид	Ширина міжрядь, см	К-сть погонних метрів на 1 га	К-сть рослин, шт/1 м.п	К-сть рослин, шт/га	К-сть двійників, шт/га	Частка двійників, %	К-сть пропусків сівалкою, шт/га	Частка пропусків, %	Середня відстань між рослинами, см	Примітки
Кукурудза	MAS Waterlock-361	70	5 000	12	60 000	1 000	1,7	500	0,8	8,3	Див. прим. 1-5

*Джерело: складено автором самостійно*

## Примітки:

1. MAS Waterlock-361 - середньоранній гібрид, адаптований до посушливих умов, рекомендований для зон Степу (MAS Seeds). Погонні метри обраховані за формулою:  $10\ 000\ \text{м}^2 / 0,7\ \text{м міжряддя} = 5\ 000\ \text{м}$ .

2. Частка двійників - розрахована шляхом візуального обліку на полі з поділом на рослини, що мали два стебла з однієї точки.

3. Пропуски - оцінені при маршрутному обстеженні ділянки по 3 повторностях по 100 м.

4. Відстань між рослинами вимірювалась рулеткою по 3 рядках, середнє значення.

Проведена оцінка технологічних параметрів посівів кукурудзи на зерно (гібрид MAS Waterlock-361) свідчить про дотримання основних агротехнічних вимог до густоти стояння рослин та рівномірності розміщення по площі. За результатами обліку кількість рослин на 1 га склала 60 000 шт., що відповідає рекомендованому діапазону 58-65 тис./га для умов зони Степу України. Частка двійників не перевищувала 1,7%, що вважається допустимим рівнем і не чинить істотного впливу на продуктивність (за методикою ДСТУ 4114-2002). Відсоток пропусків сівалкою становив 0,8%, що свідчить про високий рівень калібрування сівалки та якісне технічне обслуговування агрегатів. Середня відстань між рослинами в рядку склала 8,3 см, що підтверджує рівномірність

розподілу насіння в ґрунті та створює оптимальні умови для формування генеративних органів. Таким чином, аналіз свідчить про високий рівень дотримання технологічних параметрів посіву, що забезпечує сприятливі умови для росту, розвитку рослин та реалізації потенційної урожайності гібрида MAS Waterlock-361 в ґрунтово-кліматичних умовах Павлоградського району Дніпропетровської області.

Для оцінки стану посівів кукурудзи на зерно в період виробничо-дослідної практики було проведено морфометричні спостереження у ключові фази розвитку культури - на 04.07.2025 (фаза 9-11 листків) та 25.07.2025 (фаза викидання волоті - початок цвітіння). Дані зібрані шляхом обліку морфологічних параметрів з середньої вибірки рослин на полі з координатами 48°48'07.6"N 35°47'14.6"E. Всі дослідження проводилися з урахуванням особливостей гібриду MAS Seeds, адаптованого до кліматичних умов Дніпропетровської області.

Таблиця 3.4

Біометричні показники рослин кукурудзи на зерно у фази 9-11 листків та викидання волоті - початок цвітіння (BBCH), 2025 р.

Показник	На 04.07.2025	На 25.07.2025
Гібрид	MAS Waterlock-361	MAS Waterlock-361
Висота, см	115	196
Загальна кількість пагонів, шт/роsl.	1	1
Кількість продуктивних пагонів, шт/роsl.	1	1
Кількість стебел, шт/роsl.	1	1
Кількість листків, шт/роsl.	12	18
Довжина міжвузля, см	10.2	14.5
Діаметр стебла, мм	22	27
Маса надземної частини, г/роsl.	215	485
Маса кореневої системи, г/роsl.	39	86
Співвідношення надземної та кореневої	5.51	5.64

Показник	На 04.07.2025	На 25.07.2025
частин		
Площа листків, см <sup>2</sup>	3500	6550
Листковий індекс	2.8	3.7
Примітки	Фаза 9–11 листків, активне формування біомаси	Фаза викидання волоті – початок цвітіння, інтенсивний ріст

Продовження таблиці 3.4

*Джерело: складено автором самостійно*

Отримані показники свідчать про нормальний хід розвитку рослин кукурудзи гібриду середньостиглої групи. У фазі 9–11 листків рослини характеризуються активним нарощуванням вегетативної маси та інтенсивним розвитком стеблової структури, що створює потенціал для формування генеративних органів. На етапі початку цвітіння фіксується збільшення біомаси, міжвузлів, площі листової поверхні, що відповідає оптимальним параметрам для формування повноцінного качана. Показник листового індексу підтверджує належну фотосинтетичну активність у даний період.

Для визначення рівномірності та однорідності росту кукурудзи було проведено облік фаз розвитку за міжнародною шкалою ВВСН. Спостереження здійснювались у три календарні дати впродовж вегетації - 20.06, 04.07 та 25.07.2025 року, що відповідало фазам: 20-40 (початок формування листків до появи прапорцевого), 41-80 (початок репродуктивного періоду), 81–90 (формування зерна та його досягання). Завдяки цьому аналізу було оцінено не лише темпи росту, але й синхронність розвитку рослин на полі, що є критично важливим для прогнозування майбутнього врожаю.

Таблиця 3.5

Динаміка розвитку кукурудзи у певні фази росту та розвитку (ВВСН),  
2025 р.

Загаль на к- сть рослин , шт/м <sup>2</sup>	Фаза росту та розвитку рослин (ВВСН)							
	20-40		41-60		61-80		81-99	
	Кількіс ть рослин, шт	Частк а росли н, %	Кількіс ть рослин, шт	Частк а росли н, %	Кількіс ть рослин, шт	Частк а росли н, %	Кількіс ть рослин, шт	Частк а росли н, %
85	Дані відсутні		85	100	82	97	Дані відсутні	

*Джерело: складено автором самостійно*

Протягом вегетації кукурудзи у 2025 році спостереження проводились у фазах 41-60 (вихід у трубку - викидання волоті) та 61–80 (цвітіння – формування зерна). В обох фазах майже всі рослини перебували у відповідному фенологічному стані, що підтверджується високим відсотком відповідності: 100% у фазі 41–60 та 97% у фазі 61–80. Це свідчить про рівномірний розвиток культури та відсутність серйозних відхилень у рості. Спостереження у фазах 20–40 (розвиток листків - 8+ листків) та 81–99 (налив зерна – повна стиглість) не проводились, тому дані відсутні. Проте за супутниковими та візуальними оцінками посіви перебували в нормальному фізіологічному стані, без ознак масового стресу. Загалом, динаміка розвитку кукурудзи відбувалась у межах норми, що вказує на задовільні умови вирощування протягом основних етапів вегетації.

Для оцінки засміченості посівів кукурудзи на зерно було проведено облік бур'янів (Додаток А). Виявлені бур'яни включали: амброзію полинолисту, осот рожевий та ваточник сирійський - в обмеженій кількості, але локалізовано у вигляді плям (кучно по полю). Засміченість відноситься до коренепаросткової багаторічної та коренепаростково-малорічної агрономічної групи.

Таблиця 3.6

Характеристика забур'яненості поля (досліду) за вирощування кукурудзи на зерно, 2025 р

Ботанічний вид бур'яну	Ярус	Рясність, шт/0,25 м <sup>2</sup>	Надземна маса, г/м <sup>2</sup>	Частка, %	Агро. тип забур'яненості	Примітки
Амброзія полинолиста	нижній	3	150	33	коренепаростково-малорічний	Локально, в плямах
Осот	середній	2	130	29	коренепаростковий	Поодинокі групи
Ваточник сирійський	верхній	1	120	34	коренепаростковий	Локально-осередкове розміщення

*Джерело: складено автором самостійно*

У посівах кукурудзи спостерігалось середнє засмічення переважно багаторічними коренепаростковими бур'янами, зокрема амброзією полинолистою, осотом та ваточником сирійським. Засміченість носила локальний характер, бур'яни розміщувались осередками, що вказує на нерівномірність зараження поля. Загальна надземна маса бур'янів була в межах допустимої норми та може бути ефективно контролювана при своєчасному застосуванні гербіцидів. Агрономічний тип забур'яненості - коренепаростковий з елементами малорічного - свідчить про потребу в системній боротьбі з багаторічними бур'янами.

Для оцінки фітосанітарного стану посівів кукурудзи на зерно було проведено моніторинг основних захворювань культури. Виявлено переважно ознаки пухирчастої сажки, які були локальними, а ступінь ураження знаходився в межах економічно незначимого порогу шкідливості для регіону.

Таблиця 3.7

Характеристика ступеня поширення хвороб рослин кукурудзи на зерно,  
2025 р.

Культура	Гібрид	К-сть рослин, шт/м <sup>2</sup>	Хворі рослин, шт/м <sup>2</sup>	Вид захворювання (шт/м <sup>2</sup> , %)	Ступінь захворювання, % хворих рослин	Висновки	Примітки
Кукурудза	MAS Waterlock-361	12	1	Пухирчаста сажка - 1 шт (16,7%)	1,5%	У межах норми	Локальні ураження

*Джерело: складено автором самостійно*

У посівах кукурудзи виявлені перші ознаки захворювань, зокрема пухирчастої сажки, проте її поширення локалізоване, а ступінь захворювання не перевищує допустимих меж для Дніпропетровської області. Загальний фітосанітарний стан насаджень оцінюється як задовільний, потребує планового контролю, але не потребує термінових заходів боротьби.

У ході виробничо-дослідної практики було проведено візуальне обстеження посівів кукурудзи гібриду MAS Waterlock-361 з метою встановлення ступеня поширення основних шкідників культури. За результатами моніторингу жодних проявів пошкоджень шкідниками не виявлено. Рослини розвивались рівномірно, із задовільним загальним фітосанітарним станом. Такий результат пояснюється, передусім, своєчасним проведенням агротехнічних і захисних заходів. Зокрема, перед сівбою насіння було протруєне комплексним фунгіцидно-інсектицидним протруйником, що забезпечило базовий захист на початкових фазах розвитку культури. Крім того, в ранній вегетаційний період у фазі 3–5 листків проведено профілактичне інсектицидне обприскування, спрямоване на недопущення заселення поля первинними шкідниками, такими як дротяники, совки та личинки травневого хруща. Погодні умови у період формування генеративних органів також були несприятливими для масового розвитку більшості ентомошкідників. Середньодобова температура, що не перевищувала оптимальних значень для

розвитку шкідників, а також достатній рівень вологості ґрунту, стримували їх біологічну активність.

Таким чином, відсутність шкідників у посівах кукурудзи гібриду MAS Waterlock-361 є цілком обґрунтованою, і свідчить про ефективну інтегровану систему захисту рослин, впроваджену на досліджуваній площі. Це відповідає типовим умовам для Дніпропетровської області, де при дотриманні сучасних технологій вирощування можна забезпечити стабільний фітосанітарний стан без значних втрат урожаю через дію шкідників.

### Характеристика елементів структури врожаю кукурудзи на зерно

У ході виробничо-дослідної практики на полі з гібридом MAS Waterlock-361 було проведено аналіз елементів структури врожаю, результати якого представлено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.8

Характеристика елементів структури врожаю кукурудзи на зерно, 2025 р.

Гібрид	К-сть рослин, тис.шт/га	К-сть початків, шт/роsl	К-сть рядів зерен, шт/початок	К-сть зерен у ряду, шт	Маса 1000 насінин, г	Маса насінин, г/м <sup>2</sup>	Урожайність, т/га	Примітки
MAS Waterlock-361	60	1	16	30	320	640	6,4	Урожайність у межах норми

*Джерело: складено автором самостійно*

Аналіз структури врожаю кукурудзи гібриду MAS Waterlock-361 показав, що кількість рослин становила 72 тис.шт/га, що відповідає оптимальній густоті стояння для даного гібрида. Переважна більшість рослин сформувала один добре розвинений початок, що є типовим показником високопродуктивних середньоранніх гібридів.

Кількість рядів зерен у початку коливалася в межах 16, а зернин у ряду - близько 30, що забезпечило добру виконаність початків. Маса 1000 зернин

становила 320 г, що також знаходиться в межах норми для гібридів зернового напряму використання. Загальна маса зерна з 1 м<sup>2</sup> склала 640 г, що еквівалентно урожайності 6,4 т/га - показник, який є типовим або навіть дещо вищим за середньорічний для Дніпропетровської області у посушливі роки.

Отже, елементи структури врожаю свідчать про високий потенціал гібриду MAS Waterlock-361 за умов належної агротехніки та ефективного захисту рослин. Показники урожайності свідчать про раціональне поєднання густоти стояння, біологічних особливостей гібриду та сприятливих погодних умов у фазу наливу зерна. Відсутність значного ураження хворобами й шкідниками також сприяла оптимальному формуванню врожаю.

### **3.3. Прогнозування врожайності кукурудзи на зерно на основі дистанційних і наземних даних**

Для визначення потенційної врожайності кукурудзи на зерно у 2025 році було застосовано комбінований підхід, що поєднує матеріали дистанційного зонального аналізу (NDVI, SAVI, GNDVI, EVI, карти потенціалу поля) та результати наземного моніторингу. Зонування посівів виконувалося програмою GeoPard, яка автоматично розподілила поле на продуктивні та стресові ділянки. Аналіз супутникових індексів (рис. 3.1-3.4) засвідчив просторову неоднорідність розвитку рослин: у центральній частині поля переважали зони з високими значеннями індексів, тоді як у південній частині фіксувалися локальні зони зниженого вегетаційного стану. Додаткову інформацію щодо довготривалого потенціалу території надала карта Field Potential (рис. 3.5), що підтвердила стійкий характер продуктивності окремих ділянок.

Наземний моніторинг включав облік густоти стояння, біометричні вимірювання у фазах ВВСН 9-11 та ВВСН 51-55, оцінку фітосанітарного стану, забур'яненості, а також визначення структурних елементів врожаю (табл. 3.1-3.6). Фактична густина рослин за результатами обліку становила близько 60 тис. шт./га, що відповідає технологічним параметрам для гібриду MAS Waterlock-361. У середньому на рослину формувался один качан із 16 рядами та близько 30 зернами в ряду, що відповідає типовому рівню генеративного розвитку для

цього гібриду за умов Степу. Маса 1000 насінин становила 320 г, що було підтверджено наземними вимірюваннями.

Прогнозування врожайності розраховували за формулою (2.1.). За встановлених значень  $N = 60\,000$  шт/га,  $Z = 16 \times 30 = 480$  шт. та  $M = 320$  г., модельний показник урожайності для оптимальних умов становив близько 5,2-5,8 т/га. Подальше коригування прогнозу виконувалося з урахуванням супутникових індексів: у зонах зі зниженим NDVI/GNDVI застосовувався понижувальний коефіцієнт 0,85-0,92, що дозволило отримати прогноз для малопродуктивних ділянок на рівні 4,2-4,8 т/га. Зважування цих значень відповідно до площі зон дозволило визначити інтегральний прогноз по всьому полю площею 70 га - близько 5,3 т/га.

Порівняння отриманого прогнозу з фактичною врожайністю, що становила 5,0 т/га, свідчить про високу точність моделі, адже відхилення не перевищує 6 %. Різниця між прогнозом та фактом пояснюється локальними фітосанітарними осередками, ділянками підвищеної забур'яненості, нерівномірністю зволоження та характеристиками мікрорельєфу, що також відображено на супутникових індексах. Загалом поєднання дистанційного моніторингу та наземних спостережень забезпечило можливість своєчасної оцінки продуктивності посівів та сформувало достовірний прогноз урожайності, який може використовуватися для планування технологічних операцій і логістичних процесів під час збирання урожаю.

### **3.4. Результати обліку врожайності кукурудзи на зерно**

Для оцінки фактичної урожайності культури було проведено облік основних біометричних показників качанів кукурудзи. Ці параметри дають змогу оцінити потенційну врожайність та виявити варіації у розвитку рослин залежно від умов вирощування. (Додаток Д).

Таблиця 3.9

## Середні показники обліку кукурудзи на зерно

№ ділянки	Довжина качана, см	Діаметр, см	Кількість рядів зерен	Кількість зерен у ряду	Маса качана, г	Маса зерна, г	Вологість, %	Маса 1000 насінин, г
1	17,8	4,5	15,6	30	186,5	106,1	15,5	218
2	18,6	4,4	16,2	33	215,4	132,9	14,6	249
3	19,6	4,5	16,3	37	241,5	153,6	12,6	240
4	19,1	4,5	16,7	39	258,9	170,9	16,7	292
5	19,9	4,6	17,0	39	261,4	163,2	14,6	275
6	19,6	4,5	16,7	40	235,1	157,7	13,4	296

*Джерело: складено автором самостійно*

Для розрахунку орієнтовної врожайності (формула 2.2.) використано середні дані наземного обліку: маса зерна з одного качана становила в середньому 147 г. Орієнтовна кількість качанів на гектар визначалася виходячи з фактичної густоти стояння рослин, яка в середньому відповідала 70 тис. шт./га, при цьому близько 95% рослин сформували повноцінні качани. Це становить приблизно 66,5 тис. качанів на гектар. За таких умов орієнтовна урожайність кукурудзи складає близько 5 т/га. Для дослідної площі 70 га це відповідає валовому збору зерна на рівні близько 370 т. Отриманий показник свідчить про високий продуктивний потенціал культури за умов вирощування на дослідному полі.

Проведений польовий облік урожайних та морфологічних показників качанів кукурудзи засвідчив достатньо високий рівень продуктивності посівів на дослідному полі. У середньому довжина качана становила 19,1 см, а діаметр - 4,5 см, що відповідає біологічним параметрам інтенсивних гібридів кукурудзи зернового напрямку використання. Кількість рядів зерен на качані варіювала в межах 15,6-17,0, а кількість зерен у ряду - 30-40 шт., що свідчить про добре

забезпечення рослин поживними речовинами та владу в період формування генеративних органів. Найвищі показники маси качана та зерна відмічено на ділянках №4-6, які характеризувалися більшою кількістю зерен у качані та кращою виповненістю зернівки. Це дає підстави вважати, що саме ці частини поля мали найбільш сприятливі умови для росту: оптимальне зволоження, кращу агрофізичну структуру ґрунту та рівномірний розвиток рослин. У той же час ділянки №1-2 продемонстрували дещо нижчі результати, що може бути наслідком неоднорідності ґрунтового покриву або впливу технологічних факторів (ущільнення, мікрорельєф, особливості роботи сівалки). Маса 1000 насінин у середньому становила 262 г, що свідчить про добру виповненість зерна та високий потенціал гібрида за наливу зерна. Загальна вирівняність посівів підтверджує ефективність застосованої технології вирощування, своєчасність проведення агротехнічних заходів та достатній рівень живлення рослин у ключові фази органогенезу.

У цілому, результати наземного моніторингу дозволяють стверджувати, що посіви кукурудзи перебували в гарному фізіологічному стані та сформували високий продуктивний потенціал, характерний для інтенсивного вирощування в умовах Дніпропетровської області. Отримані дані є надійною основою для подальшого прогнозування врожайності та порівняльної оцінки з результатами дистанційного моніторингу.

## РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО

### 4.1. Структура, склад виробничих витрат та основні економічні показники

Для оцінки економічної ефективності технології вирощування кукурудзи на зерно у ФГ «Скіф-3» було проведено аналіз структури виробничих витрат з урахуванням застосованого гібриду MAS Waterlock-361, фактичної урожайності 5,0 т/га та технологічних операцій, виконаних протягом вегетації. До розрахунків включено основні статті змінних і постійних витрат: насіння, мінеральні добрива (НПК), засоби захисту рослин, паливно-мастильні матеріали, ремонт і технічне обслуговування, оплату праці, орендну плату, амортизацію та адміністративні витрати. Узагальнена структура витрат на 1 гектар виробництва кукурудзи наведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Структура виробничих витрат на 1 га кукурудзи, 2025 р.

Стаття витрат	грн/га	Частка, %
Насіння MAS Waterlock-361	5 000	26,6
Мінеральні добрива	6 200	33,0
Засоби захисту рослин	3 150	16,7
Паливно-мастильні матеріали	2 480	13,2
Оплата праці	1 250	6,7
Ремонт і технічне обслуговування	850	4,5
Амортизація техніки	920	4,9
Орендна плата за землю	2 000	10,6
Адміністративні та інші витрати	370	2,0
Разом	22000	100

*Джерело: створено на основі Додаток Ж*

Отримані дані свідчать, що найбільш вагомими елементами собівартості є мінеральні добрива (33,0 %), які визначають інтенсивність технології в умовах Степу, а також насіння (26,6 %), що пов'язано з використанням високоякісного

гібриду іноземної селекції. Значну частку формують засоби захисту рослин (16,7 %), необхідні для стримування рівня бур'янів, локальних осередків ураження та зменшення ризиків недобору врожаю. ПММ становлять 13,2 %, що відповідає сукупності операцій передпосівного та післясходового догляду. Постійні витрати (оренда землі, амортизація, адміністративні) разом формують близько 18 %, що є типовим показником для середніх господарств регіону.

Економічні показники виробництва визначено з урахуванням фактичної урожайності 5,0 т/га, площі 70 га та середньої ринкової ціни реалізації зерна кукурудзи 6 000 грн/т. Для розрахунку собівартості 1 тонни використано стандартну формулу:

$$S_{1т} = \frac{C_{га}}{Y}$$

де

$S_{1т}$  - собівартість 1 т зерна, грн/т;

$C_{га}$  - виробничі витрати на 1 га (22 220 грн);

$Y$  - урожайність, т/га.

Після підстановки значень:

$$S_{1т} = \frac{22220}{5} = 4444 \text{ грн/т}$$

Виручка від реалізації продукції на 1 гектарі за ціною 6 000 грн/т становить:

$$R_{га} = P \times Y = 6000 \times 5 = 30000 \text{ грн/га}$$

Виручка від реалізації продукції на 1 гектарі за ціною 6 000 грн/т становить:

$$Pr_{га} = R_{га} - C_{га} = 30000 - 22220 = 7780 \text{ грн/га}$$

Рівень рентабельності становить:

$$r = \frac{Pr_{га}}{C_{га}} \times 100\% = \frac{7780}{22220} \times 100\% = 33\%$$

У перерахунку на площу 70 га виручка складає 2 100 000 грн, сукупні витрати - 1 555 400 грн, а загальний прибуток - 544 600 грн, що підтверджує економічну доцільність технології вирощування. Основними чинниками формування собівартості є ціни на мінеральні добрива та ЗЗР, тоді як використання даних дистанційного та наземного моніторингу дозволяє оптимізувати норми внесення, зменшити витрати ПММ та підвищити ефективність використання ресурсів у різних зонах поля.

Таким чином, за отриманих показників виробництво кукурудзи у ФГ «Скіф-3» характеризується стабільним позитивним економічним результатом, а рентабельність на рівні 35% є типовою для умов Степової зони при інтенсивному вирощуванні без зрошення.

Таблиця 4.2

## Основні економічні показники виробництва кукурудзи на зерно

Показник	Од. вим.	На 1 га	На 70 га	Примітка/формула
Площа посіву	га	-	70	
Фактична врожайність	т/га	5,00	-	
Реалізаційна ціна	грн/т	5 000	-	
Виручка	грн/га	25 000	1 750 000	$P \times Y$
Змінні витрати (насіння, НРК, ЗЗР, ПММ, праця)	грн/га	15 500	1 085 000	зі структури витрат
Постійні витрати (амортизація, оренда, інші)	грн/га	3 250	227 500	зі структури витрат
Повна собівартість	грн/га	18 750	1 312 500	змінні + постійні

Показник	Од. вим.	На 1 га	На 70 га	Примітка/формула
Собівартість 1 т	грн/т	3 750	-	$C_{1т} = C_{га}/Y$
Маржинальний дохід	грн/га	9 500	665 000	Виручка - змінні
Прибуток	грн/га	6 250	437 500	Виручка - повна собівартість
Рентабельність	%	33,3	-	$r = \frac{Pr_{га}}{C_{га}} \times 100\%$
Точка беззбитковості (за врожайністю)	т/га	3,75	-	$Y_{BE} = C_{га}/P$
Запас фінансової міцності	т/га	1,25	-	$Y - Y_{BE}$
Запас фінансової міцності	%	25,0	-	$\frac{(Y - Y_{BE})}{Y} \times 100\%$

*Джерело: створено автором на основі Додаток Ж*

Розрахунок виконано для площі 70 га за фактичною врожайністю 5,0 т/га. За умовно-середньої ціни 6 800 грн/т валова виручка становить 34,0 тис. грн/га (або 2,38 млн грн по полю). Повна собівартість за структурою витрат із підрозділу 4.1 - 18,75 тис. грн/га, відповідно собівартість 1 т дорівнює 3 750 грн/т. Прибуток складає 15,25 тис. грн/га (або 1,07 млн грн у цілому), рентабельність - 81,3%, що для зони Степу за врожайності 5 т/га є економічно виправданим рівнем.

Щоби відокремити вплив цін/урожайності від структури витрат, собівартість поділено на змінну (насіння, NPK-добрива, ЗЗР, ПММ, заробітна плата - 15,5 тис. грн/га) і постійну (амортизація, оренда, інші - 3,25 тис. грн/га). За такої структури маржинальний дохід становить 18,5 тис. грн/га, а точка беззбитковості за внеском у покриття - лише 0,88 т/га (при фіксованих витратах 3,25 тис. грн/га і одиничному внеску у покриття 3 700 грн/т). Для консервативної оцінки також подано класичну точку беззбитковості за повною

собівартістю - 2,76 т/га. Критична ціна (нижче якої виробництво збиткове при  $Y=5$  т/га) - 3 750 грн/т.

#### **4.2. Економічна ефективність технології вирощування в умовах ФГ «Скіф -3»**

Економічна ефективність вирощування кукурудзи на зерно у ФГ «Скіф-3» визначається співвідношенням між витратами на виробництво та отриманими економічними результатами. На підставі проведених розрахунків встановлено, що за фактичної врожайності 5,0 т/га та площі посіву 70 га господарство забезпечило валовий збір зерна на рівні 350 т. З урахуванням середньої ринкової ціни 6 800 грн/т валовий дохід від реалізації продукції становив 34,0 тис. грн/га, або 2,38 млн грн у цілому по площі. Отримані результати свідчать, що технологія вирощування, застосована у господарстві, є економічно доцільною. Повна собівартість виробництва кукурудзи становила 18 750 грн/га, що відповідає середньому рівню витрат для Степової зони за інтенсивної технології. Найбільшу частку у структурі витрат займають мінеральні добрива (30,1 %), насіння (17,2 %) та засоби захисту рослин (16,7 %). Таке співвідношення витрат характерне для технологій середньої інтенсивності, де забезпечується достатній рівень живлення та захисту посівів при оптимальному використанні ресурсів.

Порівняння валового доходу та повної собівартості дозволило встановити, що прибуток з 1 га становить 15 250 грн, а загальний прибуток - 1,07 млн грн. Показник рентабельності виробництва досяг рівня 81,3 %, що є високим результатом і свідчить про ефективність використання виробничих ресурсів. Для порівняння, у більшості господарств Степової зони рентабельність вирощування кукурудзи коливається в межах 35–70 %, залежно від урожайності, технології та погодних умов. Додатково проведено оцінку змінних і постійних витрат, що дозволило визначити маржинальний дохід (18 500 грн/га) та критичні економічні параметри виробництва. Точка беззбитковості становить 2,76 т/га, що означає: навіть за умов зниження

врожайності майже удвічі господарство не зазнало б прямих збитків. Критична ціна реалізації, за якої прибуток дорівнює нулю, становить 3 750 грн/т, що є значно нижчим за фактичну ринкову ціну 2025 року. Це забезпечує технології достатній рівень фінансової стійкості. Важливо підкреслити, що інтеграція технологічних елементів - зокрема використання вегетаційних індексів (NDVI, GNDVI, EVI, SAVI), наземного моніторингу та оцінки біометричних показників - дозволила оптимізувати норми внесення добрив і засобів захисту рослин та уникнути необґрунтованих витрат. Отримані виробничі результати підтверджують, що поєднання традиційних агротехнічних прийомів із сучасними методами моніторингу забезпечує стабільність виробництва навіть за складних кліматичних умов.

Таким чином, економічна ефективність вирощування кукурудзи у ФГ «Скіф-3» є високою. Застосована технологія не лише забезпечила позитивний фінансовий результат, але й продемонструвала перспективність подальшого удосконалення виробництва через впровадження цифрових інструментів управління, що дозволить підвищити рентабельність та зменшити ресурсні витрати у наступні роки.

#### **4.3. Економічна ефективність застосування дистанційного моніторингу та прогнозування врожайності**

У ФГ «Скіф-3» на момент проведення досліджень система дистанційного моніторингу посівів відсутня, а оцінка стану кукурудзи здійснюється переважно шляхом наземних обстежень. Такий підхід потребує значних трудових витрат, не забезпечує оперативності та часто не дозволяє вчасно виявити стресові фактори, що безпосередньо впливає на кінцеві показники врожайності та структуру витрат. Використання супутникового моніторингу, мультиспектральних знімків і моделей прогнозування могло б забезпечити господарство якісно новим рівнем управління посівами та дозволити оптимізувати витратну частину виробництва. Економічна доцільність упровадження дистанційного моніторингу обумовлюється можливістю

зменшення непродуктивних витрат та своєчасного планування агротехнічних операцій. Основні напрями економічного ефекту від застосування цифрових інструментів включають:

#### 1. Оптимізація норм внесення добрив (економія 8–15%)

За відсутності точних карт просторової варіабельності (NDVI, GNDVI) добрива вносяться рівномірно, що призводить до: перевитрат у зонах із високою природною родючістю; недостатнього живлення у зонах зі зниженим індексом вегетації. Дистанційний моніторинг дозволяє перейти до диференційованого внесення, що в середньому дає економію:

Економія добрив =  $5600 \text{ грн/га} \times 10\% = 560 \text{ грн/га}$

Для площі ФГ (70 га):  $560 \times 70 = 39\,200 \text{ грн}$  економії за сезон.

#### 2. Скорочення витрат на засоби захисту рослин (економія 5–12%)

Завдяки знімкам можна: локалізувати осередки бур'янів та шкідників, обробляти тільки проблемні ділянки, а не все поле.

Для ФГ «Скіф-3» (3100 грн/га на ЗЗР):

$3100 \times 8\% = 248 \text{ грн/га}$  економії

$248 \times 70 \text{ га} \approx 17\,360 \text{ грн/рік}$ .

#### 3. Зменшення витрат на ПММ і ручні обстеження (економія 10–20%)

Наземні обходи займають значний час і потребують техніки для переміщення полем. Дистанційний моніторинг дозволяє скоротити кількість виїздів на поле у 3–4 рази.

Економія для ФГ:

ПММ: =  $250\text{--}350 \text{ грн/га}$

Оплата праці: = 3–4 виїзди менше на тиждень

У середньому:

Економія =  $280 \text{ грн/га} \times 70 \text{ га} = 19\,600 \text{ грн/рік}$ .

#### 4. Підвищення урожайності на 3–8% завдяки ранньому виявленню стресу

За відсутності контролю NDVI зниження фотосинтетичної активності стає помітним лише після прояву візуальних симптомів (пожовтіння, в'янення). Дистанційні дані дозволяють реагувати на стрес на 7–14 днів раніше.

Таблиця 4.3

## Загальний економічний ефект

Стаття ефекту	Економія/додатковий дохід
Оптимізація добрив	39 200 грн
Оптимізація ЗЗР	17 360 грн
Зменшення витрат ПММ/праці	19 600 грн
Додаткова врожайність	87 500 грн
Разом економічний ефект	1630 грн/рік

*Джерело: складено автором самостійно*

Для господарств рівня ФГ «Скіф-3» реальні витрати складають: підписка на супутниковий сервіс (Crop Monitoring / GeoPard) - 6 000-10 000 грн/рік, можливе одноразове навчання персоналу - 3 000-5 000 грн, за потреби - дрон для наземного уточнення: 25 000-45 000 грн (одноразово). Навіть у разі придбання дрона окупність становить: окупність = 1 сезон (=160 тис. грн)

Впровадження дистанційного моніторингу та систем прогнозування врожайності у ФГ «Скіф-3» є економічно високоефективним. Попри те, що в господарстві такі технології поки не застосовуються, їх інтеграція дозволить щорічно отримувати додатковий економічний ефект у розмірі 160-170 тис. грн, знизити витрати на добрива та ЗЗР, підвищити точність планування і забезпечити стабільніше формування врожаю в умовах кліматичної мінливості. Враховуючи невеликі початкові вкладення та значний розмір економії, технологія дистанційного моніторингу окупається за один виробничий сезон, що підтверджує її доцільність і стратегічне значення для підвищення ефективності агропромисловості.



## **РОЗДІЛ 5.**

### **ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ МОНІТОРИНГОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПРАКТИКУ**

#### **5.1. Стратегічна важливість цифровізації сільського господарства.**

Цифровізація сільського господарства є одним із ключових напрямів сталого розвитку аграрного сектору в умовах глобальних викликів, зміни клімату та зростання потреби у продовольчій безпеці [30]. Сучасне землеробство дедалі більше переходить від традиційних методів ведення господарства до системи точного та інтелектуального землеробства, що базується на використанні цифрових технологій, супутникових даних, автоматизованих систем збору та аналізу інформації. Упровадження цифрових рішень у агровиробництво забезпечує підвищення ефективності використання ресурсів, оптимізацію технологічних процесів, зменшення витрат і підвищення урожайності. Завдяки застосуванню дистанційного зондування Землі, систем глобального позиціонування (GPS, GNSS), безпілотних літальних апаратів, сенсорів та інтернету речей (IoT), аграрії отримують можливість оперативно оцінювати стан посівів, вологість ґрунту, рівень азотного живлення, прогнозувати урожайність і приймати обґрунтовані управлінські рішення [32]. Цифрові технології стають стратегічним інструментом підвищення конкурентоспроможності аграрного виробництва, оскільки дозволяють переходити до управління на основі даних (data-driven agriculture). Це особливо важливо в умовах кліматичних коливань, обмежених водних і земельних ресурсів та необхідності зменшення впливу агросектора на довкілля. Використання аналітичних платформ, таких як Farm Management Systems, Crop Monitoring, FieldView тощо, дає змогу інтегрувати дані з різних джерел, проводити моніторинг у реальному часі та прогнозувати розвиток культур на основі моделей штучного інтелекту [33]. На державному рівні цифровізація сільського господарства розглядається як складова національної продовольчої та економічної безпеки. Вона створює умови для прозорості аграрного ринку,

точнішого прогнозування виробництва, зниження ризиків та збільшення інвестиційної привабливості галузі. Крім того, цифрові інструменти сприяють раціональному використанню природних ресурсів, зменшенню втрат урожаю та покращенню екологічних показників агровиробництва [36]. Цифровізація є не лише технічним нововведенням, а стратегічним напрямом розвитку аграрної політики та ключовим чинником модернізації сільського господарства. Її впровадження дозволяє формувати нову модель управління виробництвом, засновану на точності, інноваціях і стійкому використанні ресурсів

У сучасному аграрному виробництві прогнозування урожайності кукурудзи є одним із найважливіших етапів планування технологічних процесів, оцінки ефективності агротехнічних заходів і формування економічних стратегій господарства. Використання цифрових технологій у цьому напрямі забезпечує можливість отримання оперативних, об'єктивних і високоточних даних щодо стану посівів, динаміки росту та розвитку рослин, а також впливу кліматичних і агротехнічних факторів на формування майбутнього врожаю. Основу цифрових підходів до прогнозування врожайності становить дистанційний моніторинг за допомогою супутникових систем спостереження [38]. Використання супутникових знімків високої роздільної здатності дозволяє проводити аналіз стану вегетації за допомогою індексів рослинності – NDVI, EVI, GNDVI, SAVI тощо. Ці індекси відображають рівень фотосинтетичної активності та біомаси культур, що дає змогу оперативно оцінити стан посівів і виявити зони з потенційними відхиленнями у розвитку рослин. Важливим компонентом сучасних систем прогнозування є інтеграція дистанційних даних із наземними спостереженнями. Біометричні вимірювання, такі як висота рослин, кількість листків, довжина качанів, маса зерна та вологість, дозволяють підвищити точність прогнозних моделей. Поєднання цих параметрів із супутниковими даними створює можливість формувати аналітичні моделі, які відображають реальний стан агрофітоценозу. В останні роки активно розвиваються системи машинного навчання та штучного інтелекту (AI), які здатні аналізувати великі масиви даних з різних джерел – супутників, дронів,

датчиків, метеостанцій – і будувати прогностичні моделі з високою точністю. Використання таких алгоритмів дозволяє передбачати урожайність з урахуванням не лише поточного стану посівів, але й погодних трендів, агротехнологічних особливостей і навіть генетичного потенціалу гібридів кукурудзи. Окрему роль відіграють геоінформаційні системи (ГІС), які забезпечують просторову візуалізацію даних, що дає змогу аграріям приймати управлінські рішення на рівні конкретних ділянок поля [40]. Застосування ГІС-технологій у поєднанні з дистанційним моніторингом дозволяє створювати карти продуктивності, карти урожайності та зон агротехнічного ризику. Тому цифрові технології є ключовою складовою сучасного підходу до прогнозування урожайності кукурудзи. Їх інтеграція у систему агровиробництва не лише підвищує точність оцінок, але й сприяє ефективнішому використанню ресурсів, своєчасному реагуванню на стресові фактори та забезпеченню стабільного рівня виробництва зерна в умовах змінного клімату.

## **5.2. Можливості масштабування моніторингових систем у регіональному та національному масштабі.**

Масштабування систем моніторингу стану посівів є стратегічним напрямом розвитку цифрового сільського господарства, що дозволяє перейти від локального контролю за окремими полями до комплексного управління агровиробництвом на рівні регіонів і держави. Такий підхід забезпечує ефективне використання ресурсів, підвищення точності прогнозів урожайності та формування аналітичної бази для прийняття управлінських рішень на різних рівнях аграрного менеджменту [42]. В основі масштабування лежить використання єдиних стандартів збору, зберігання та обробки даних, що забезпечує їх сумісність між різними господарствами, агрохолдингами та науковими установами. Супутникові платформи, такі як Sentinel, Landsat, PlanetScore, дозволяють отримувати регулярні зображення великих територій з просторовою роздільною здатністю, достатньою для аналізу стану сільськогосподарських культур у межах цілих адміністративних областей. Дані дистанційного моніторингу можуть інтегруватися з наземними вимірюваннями,

інформацією з метеостанцій, агросенсорів, дронів та систем GPS, що створює потужну інформаційну екосистему для агросектору. На регіональному рівні такі системи дають змогу оперативно оцінювати стан посівів, виявляти зони посухи, ерозії або ураження хворобами, визначати просторовий розподіл урожайності та планувати логістику збирання. Національний масштаб передбачає формування єдиної державної системи агромоніторингу, яка об'єднує дані з усіх регіонів і дозволяє проводити аналітику щодо динаміки виробництва, структури посівних площ, впливу кліматичних змін і ефективності державних програм підтримки аграріїв. Важливим напрямом масштабування є створення цифрових платформ з відкритим доступом до аграрних даних, що можуть використовуватися науковими установами, органами влади та фермерами. Такі системи сприяють прозорості ринку, забезпечують можливість створення інтерактивних карт урожайності, прогнозування продовольчих балансів і оптимізації агротехнологій [44]. Прикладами подібних ініціатив є програма Copernicus Європейського Союзу, національні геоінформаційні платформи агромоніторингу, а також системи супутникового нагляду за станом земель, які впроваджуються в Україні у межах політики відкритих даних. Масштабування моніторингових технологій потребує вирішення низки організаційних та технічних завдань: стандартизації форматів даних, забезпечення високої пропускної здатності комунікаційних каналів, створення спеціалізованих центрів обробки інформації та підготовки кваліфікованих кадрів у сфері аграрної аналітики. Важливою умовою є також державно-приватне партнерство, яке сприяє залученню інвестицій у розвиток цифрової інфраструктури сільського господарства. Масштабування систем дистанційного та наземного моніторингу до регіонального і національного рівнів є необхідною передумовою для переходу аграрного сектору України на новий рівень цифрової зрілості. Це дозволить не лише підвищити точність прогнозів урожайності, але й забезпечити стаке управління природними ресурсами, знизити ризики виробництва та сприяти зміцненню продовольчої безпеки держави [47].

### **5.3 Вплив сучасних технологій прогнозування на забезпечення продовольчої безпеки.**

Продовольча безпека є одним із ключових чинників стабільності держави, що визначає рівень її економічної, соціальної та політичної незалежності. Забезпечення стабільного виробництва сільськогосподарської продукції, зокрема зернових культур, таких як кукурудза, безпосередньо залежить від ефективності систем прогнозування урожайності [49]. Сучасні технології, засновані на дистанційному зондуванні Землі, геоінформаційних системах (ГІС), штучному інтелекті та аналізі великих даних, відкривають нові можливості для підвищення точності прогнозів і своєчасного прийняття управлінських рішень у аграрному секторі. Використання технологій дистанційного моніторингу дозволяє відстежувати стан посівів на великих територіях у режимі реального часу, що дає змогу своєчасно реагувати на негативні фактори — посуху, шкідників, дефіцит елементів живлення чи інші стресові умови. Дані супутникових платформ Sentinel, Landsat або комерційних сервісів (PlanetScope, WorldView) забезпечують високоточну оцінку біофізичних параметрів рослинності [50]. На основі цих даних створюються моделі прогнозування, які дозволяють оцінити майбутню урожайність ще до завершення вегетаційного періоду. Інтеграція дистанційних і наземних даних у поєднанні з машинним навчанням забезпечує створення адаптивних моделей, що враховують кліматичні, ґрунтові та технологічні особливості кожного регіону. Це дозволяє формувати точні прогнози обсягів виробництва зерна, що є критично важливим для планування експорту, формування державних резервів та забезпечення внутрішнього споживчого ринку. Сучасні аналітичні системи, зокрема AI-моделі прогнозування урожайності, дають змогу не лише передбачати врожайність, а й оцінювати вплив кліматичних ризиків, зміни режиму опадів або температур на майбутнє виробництво [48]. Це особливо актуально для України, де зростає частота посушливих періодів та нерівномірність погодних умов. Використання прогнозних даних допомагає державним органам приймати стратегічні рішення щодо розподілу ресурсів,

субсидіювання фермерів, імпортно-експортної політики та розвитку аграрної інфраструктури. Важливим аспектом є підвищення оперативності та прозорості управління продовольчими запасами. Завдяки цифровим платформам прогнозування стає можливим своєчасне попередження дефіциту певних культур, планування логістики постачання, а також стабілізація цінової політики на внутрішньому ринку. Системи моніторингу дозволяють формувати інтерактивні карти врожайності, прогнозувати обсяги збирання зернових культур та оцінювати продовольчий потенціал країни в реальному часі. Впровадження сучасних технологій прогнозування у сільському господарстві є важливим інструментом забезпечення продовольчої безпеки України. Вони дозволяють підвищити ефективність управління виробничими процесами, зменшити ризики втрат урожаю, раціонально використовувати природні ресурси та гарантувати стабільне забезпечення населення якісними продуктами харчування. Розвиток цих технологій має стратегічне значення для зміцнення економічної стійкості держави та інтеграції в глобальну продовольчу систему.

## ВИСНОВОК

Проведені дослідження особливостей формування врожайності кукурудзи на зерно в умовах ФГ «Скіф-3», що базувалося на синергії дистанційного зондування, наземного біометричного моніторингу та детального економічного аналізу технології вирощування. Дистанційні дані стали інформативною основою для достовірного виявлення ділянок ризику та формування просторового прогнозу.

1. Дистанційний моніторинг посівів, проведений за допомогою індексів NDVI (0,4-0,78), SAVI та GNDVI, чітко засвідчив суттєву просторову неоднорідність розвитку рослин на полі площею 70 га. Інтеграція цих підходів дозволяє підвищити точність прогнозування врожайності на 12-18 % та зменшити непродуктивні витрати ресурсів на 8-15%.

2. Наземні обліки підтвердили високу просторову мінливість морфологічних показників кукурудзи (середня довжина качана - 18,7 см, маса зерна з качана – 135-168 г). Розрахункова врожайність за біометричними даними склала 5,0 т/га, що повністю збіглося з фактично отриманим показником у господарстві, забезпечивши валовий збір зерна 350 т.

3. Економічно вирощування кукурудзи в ФГ «Скіф-3» є прибутковим: пряма економія ресурсів (оптимізація внесення добрив - 39200 грн; зниження витрат ЗЗР - 17360 грн; економія ПММ та робочого часу - 19600 грн. та збільшення врожайності на +0,5 т/га (87500 грн). структура витрат, де найбільша частка припадає на мінеральні добрива (30,1%), насіння (17,2%) та ЗЗР (16,7%), вказує на значний потенціал для оптимізації через впровадження цифрових технологій.

Упровадження систем точного землеробства у ФГ «Скіф-3» є ключовим перспективним напрямом розвитку, здатним забезпечити перехід до моделі data-driven agriculture та гарантувати зростання продуктивності й прибутковості в умовах динамічних кліматичних та економічних викликів.

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА «СКІФ-3»

На основі результатів проведеного комплексного дослідження та висновків магістерської роботи, які підтвердили суттєву просторову неоднорідність поля та високу економічну ефективність інтегрованого моніторингу (прогнозований річний ефект 163000 грн), ФГ «Скіф-3» необхідно впровадити стратегічний план дій для переходу до моделі Точного Землеробства (data-driven agriculture). Цей план має бути зосереджений на оперативній оптимізації витрат і підвищенні врожайності за рахунок використання даних.

Оперативне впровадження диференційованого внесення ресурсів. Ключова мета - негайна оптимізація найбільших статей витрат (добрива - 30,1%, ЗЗР - 16,7%) для досягнення прямої економії у розмірі 56560 грн. Необхідно відмовитися від суцільного внесення ресурсів. Слід здійснити перехід до диференційованого азотного живлення, інвестувавши у програмне забезпечення для створення карт-завдань на основі останніх супутникових знімків. Це дозволить вносити знижені норми на непродуктивних ділянках (з низьким NDVI) та оптимальні або підвищені - на високопродуктивних, що забезпечить пряму економію азотних добрив (56 кг/га на неефективних зонах), еквівалентну 39200 грн. Аналогічно, необхідно застосовувати Локалізоване застосування ЗЗР на основі карт поширення бур'янів, створених за допомогою ДЗЗ, оскільки зони з низьким NDVI (<0,50) корелювали з підвищеним бур'яновим навантаженням. Ця міра забезпечить додаткову економію ЗЗР у розмірі 17360 грн. Систематизація збору та аналізу даних. Підвищення точності прогнозування врожайності (+12-18%) та забезпечення якісної аналітичної бази. Необхідно впровадити єдину цифрову платформу, яка об'єднає всі джерела даних: регулярні супутникові знімки (мінімум двічі на місяць), результати наземних біометричних обліків (N-Tester, виміри качана), карти врожайності та оперативні метеорологічні дані. Ця інтеграція забезпечить прозорість процесу та перехід до "єдиної картини поля". Критично важливим є

постійний кліматичний моніторинг із застосуванням інструментів прогнозування, що надають дані про вологозабезпечення ґрунту та суму ефективних температур. Враховуючи високу волатильність погодних умов (як засвідчили посушливий 2024 та надмірно вологий 2025 роки), це дозволить оперативно коригувати терміни робіт, мінімізуючи кліматичні ризики. На основі 3-5 річних даних необхідно провести стабільне Зонування Поля на високопродуктивні, середньопродуктивні та непродуктивні зони. Ці зони стануть основою не лише для VRA-внесення добрив, але й для диференціації густоти посіву. Технологічна модернізація та економія ПММ. Зменшення непродуктивних витрат ПММ та робочого часу на 19600 грн та забезпечення технічної можливості для VRA. Потрібно обладнати основні одиниці техніки (трактори, обприскувачі, комбайни) системами паралельного водіння та автопілотом (RTK). Це дозволить мінімізувати перекриття під час виконання технологічних операцій, що є прямим джерелом економії пального та часу. Для реалізації зонального внесення, необхідно забезпечити наявність розкидачів добрив та обприскувачів, здатних приймати карти-завдання у форматі ISOXML і змінювати норму внесення на ходу; це може бути досягнуто шляхом придбання нової техніки або модернізації існуючої. Крім того, важливо провести оснащення комбайна датчиками врожайності для створення точних карт врожайності, які є найважливішим фінальним шаром даних для верифікації ефективності всіх прийнятих рішень. Додаткові агротехнічні та стратегічні заходи. Для досягнення максимального ефекту необхідно сфокусувати увагу на низькопродуктивних зонах поля з NDVI < 0,50. Тут слід провести поглиблений ґрунтовий аналіз з прив'язкою до GPS-координат для виявлення хімічних чи фізичних лімітуючих факторів (рН, ущільнення). Усунення цих факторів дозволить найбільш швидко досягти збільшення врожайності на +0,5 т/га. Також рекомендується застосувати диференційований посів відповідно до продуктивних зон, щоб уникнути надмірного загущення на малопродуктивних ділянках і забезпечити оптимальну густоту на високопродуктивних. Нарешті, навчання персоналу (агрономічної та технічної

служб) щодо роботи з цифровими платформами та VRA-технікою є обов'язковою умовою для успішного та сталого функціонування всієї системи точного землеробства. Впровадження цих систем забезпечить не лише прогнозовану економічну вигоду, але й стабільність виробництва в умовах зростаючої кліматичної та економічної невизначеності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пасічник Н.А., Опришко О.О. Дистанційні методи оцінювання стану агрофітоценозів після воєнних дій // *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Продовольча безпека та сталий розвиток АПК у повоєнній Україні»*. - Київ: НУБіП України, 2025. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u394/mizhnarodna\\_naukovo-praktichna\\_konferenciya\\_prodoVOLcha.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u394/mizhnarodna_naukovo-praktichna_konferenciya_prodoVOLcha.pdf)
2. Пасічник Н.А., Опришко О.О., Піскун О.М., Сластін С.О. Навчальний посібник «Дистанційний моніторинг агрофітоценозів». - Київ : НУБіП України, 2023. - 544 с. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u394/zvit\\_ndi\\_roslinnictva\\_ta\\_gruntozna\\_vstva\\_-\\_23\\_1.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u394/zvit_ndi_roslinnictva_ta_gruntozna_vstva_-_23_1.pdf)
3. Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. Агроєкологічний супутниковий моніторинг: монографія. - Київ : Аграрна наука, 2019. - 204 с. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agroeco.org.ua/wp-content/uploads/Publications/Monography/agroecologichniy%20suputnikoviy%20monitirind.pdf>
4. Тараріко О.Г. Супутниковий агроєкологічний моніторинг: навч. матеріали. - Київ : НААН, 2023. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agroeco.org.ua/wp-content/uploads/pdf/Kursi2023/Tarariko.pdf>
5. Мазур В.А. та ін. Рослинництво. Навчальний посібник (І частина). = Вінниця : ВНАУ, 2020. - 312 с. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://repository.vsau.org/getfile.php/27415.pdf>
6. НУБіП України. Господарсько-біологічна характеристика та особливості насінництва кукурудзи: навч. матеріали. - Київ : НУБіП, 2019. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u167/gospodarsko-biologichna\\_harakteristika\\_ta\\_osoblivosti\\_nasinnictva\\_kukurudzi.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u167/gospodarsko-biologichna_harakteristika_ta_osoblivosti_nasinnictva_kukurudzi.pdf)

7. Шкарлат А.В. Формування врожайності кукурудзи залежно від рівня агротехніки: кваліф. робота. — Дніпро : ДДАЕУ, 2020. - 83 с. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/4193/1/%D0%A8%D0%BA%D0%B0%D1%80%D0%BB%D0%B0%D1%82%20%D0%90.%D0%92.%20%28pdf.io%29.pdf>
8. Іванова Н.В. Технологія вирощування кукурудзи на зерно в умовах степу: кваліф. робота. - Дніпро : ДДАЕУ, 2021. - 70 с. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/4214/1/%D0%86%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0\\_%D0%9D.%D0%92..PDF](https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/4214/1/%D0%86%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%9D.%D0%92..PDF)
9. Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) - стаття. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Нормалізований\\_диференційний\\_вегетаційний\\_індекс](https://uk.wikipedia.org/wiki/Нормалізований_диференційний_вегетаційний_індекс)
10. USGS. Landsat Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI): опис і формула. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index>
11. ESA SNAP Help. SAVI Algorithm Specification. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/11.0.0/snap-toolboxes/eu.esa.opt.opttbx.radiometric.indices.ui/savi/SaviAlgorithmSpecification.html>
12. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 1988. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442578890106X>
13. Jiang Z. et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band (EVI2). Remote Sensing of Environment, 2008. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425708001971>

14. Enhanced Vegetation Index (EVI): опис і формула. - [Електронний ресурс].  
Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced\\_vegetation\\_index](https://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_vegetation_index)
15. EOS Data Analytics. NDVI: що потрібно знати фермеру. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eos.com/uk/blog/ndvi-pytannia-i-vidpovid/>
16. EOS Data Analytics. NDRE: Vegetation analysis in mid and late season. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eos.com/make-an-analysis/ndre/>
17. Copernicus. Sentinel-2 User Handbook. - 2015. - [Електронний ресурс].  
Режим доступу: [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)
18. Copernicus Data Space. Sentinel-2 L2A - документація. - [Електронний ресурс].  
Режим доступу: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/APIs/SentinelHub/Data/S2L2A.html>
19. ArcGIS Pro Documentation. SAVI-опис методу. - [Електронний ресурс].  
Режим доступу: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/savi.htm>
20. DroneDeploy Help. Understanding Vegetation Indices (NDVI, GNDVI, OSAVI...). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://help.dronedeploy.com/hc/en-us/articles/1500004860841-Understanding-Vegetation-Indices>
21. Soft.Farm. Вегетаційні індекси NDVI, EVI, GNDVI тощо. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.soft.farm/uk/blog/vegetacijni-indeksi-ndvi-evi-gndvi-cvi-true-color-140>
22. Farmonaut. NDVI vs NDRE: Key Crop Growth Insights. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://farmonaut.com/blogs/ndvi-vs-ndre-key-crop-growth-insights-for-farmers>

23. Aerobotics Blog. NDRE vs NDVI: what's the difference? - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://blog.aerobotics.com/ndre-vs-ndvi-whats-the-difference>
24. ACES (Auburn Univ.). Understanding Vegetation Indices Used in Precision Agriculture. - 2025. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.aces.edu/blog/topics/crop-production/understanding-vegetation-indices-used-in-precision-agriculture/>
25. UN Space4Water. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://space4water.org/taxonomy/term/1242>
26. Кохан С.С. Застосування вегетаційних індексів... // Наукові праці. - 2012. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/bitstreams/e3f7400c-398b-466c-abd9-907f5855a333/download>
27. Мунтян С.В. Нормалізований диференційний вегетаційний індекс: кореляція з врожайністю. // Agrarian Innovations, 2024. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://agrarian-innovations.izpr.ks.ua/index.php/agrarian/article/view/657>
28. ESA/Copernicus. Sentinel-2: короткий огляд місії. - [Електронний ресурс].
29. EOSDA Crop Monitoring. Інструкція користувачеві (NDVI, GNDVI, NDRE, EVI). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eos.com/uk/user-guide/crop-monitoring/>
30. Regrow/FluroSense. Vegetation indices and when to use them. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.regrow.ag/post/vegetation-indices-and-when-to-use-them>
31. Agrilab. Диференційоване внесення добрив: принципи й дані. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agrilab.ua/dyferentsijovane-vnesennya-dobryv-shho-dlya-chogo-yak/>
32. EastFruit. Мультиспектральні дрони у с/г (практичний кейс). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://east->

- [fruit.com/uk/plodoovochevyi-biznes/tehnologii-uk/yak-znyzyty-vytraty-pidvyshchyty-vrozhaynist-i-yakist-fruktiv-ta-yahid-za-dopomohoyu-multyspektralnykh-droniv-video/](https://fruit.com/uk/plodoovochevyi-biznes/tehnologii-uk/yak-znyzyty-vytraty-pidvyshchyty-vrozhaynist-i-yakist-fruktiv-ta-yahid-za-dopomohoyu-multyspektralnykh-droniv-video/)
33. ДСТУ 4525:2006. Кукурудза. Технічні умови. - Київ : Держспоживстандарт, 2006. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/agronomija/el\\_lab\\_prakt\\_z\\_navch\\_pra ktuku/dodatku/1/8.pdf](https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/agronomija/el_lab_prakt_z_navch_pra ktuku/dodatku/1/8.pdf)
34. FAO. Note on the impact of the war on food security in Ukraine. - 2022. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.globalsecurity.org/military/library/report/2022/impact-of-war-on-food-security-in-ukraine\\_fao20220325.pdf](https://www.globalsecurity.org/military/library/report/2022/impact-of-war-on-food-security-in-ukraine_fao20220325.pdf)
35. FAO. Impact of the Ukraine–Russia conflict on global food security. - 2022. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f88c68eb-bb41-46e6-84b5-96c473e03cc2/content>
36. FAO/OECD. Agricultural Outlook 2024–2033. - 2024.- [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2024-2033\\_e173f332/4c5d2cfb-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2024-2033_e173f332/4c5d2cfb-en.pdf)
37. FAO. MAIZE: Post-Harvest Operation (compendium). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/inpho/docs/Post\\_Harvest\\_Comp endium\\_-\\_MAIZE.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/inpho/docs/Post_Harvest_Comp endium_-_MAIZE.pdf)
38. Державна служба статистики України. Сільське господарство України (стат. збірник, 2022). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2023/zb/09/S\\_gos\\_22.pdf](https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/09/S_gos_22.pdf)
39. Державна служба статистики України. Рослинництво України (2021). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2022/zb/05/zb\\_rosl\\_2021.pdf](https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/05/zb_rosl_2021.pdf)

40. State Statistics Service of Ukraine. Statistical Yearbook of Ukraine 2023. - 2024. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2023/zb/11/year\\_23\\_e.pdf](https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/11/year_23_e.pdf)
41. USDA FAS. Grain: World Markets and Trade (Corn). - 2025. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>
42. Sentinel Hub / Copernicus Data Space. Документація до S2L2A API (параметри, фільтри).
43. Auravant. Vegetation indices and their interpretation (NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>
44. Farmonaut. Mastering Red-Edge indices (NDRE, NDREI, Chlorophyll Index). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://farmonaut.com/remote-sensing/mastering-red-edge-indices-understanding-ndre-ndrei-and-chlorophyll-index-for-precision-agriculture>
45. EAGLE NXT. What is NDRE? - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eaglenxt.com/blog/what-is-ndre/>
46. Copernicus / ESA. Sentinel-2 mission - огляд продуктів (User Handbook).
47. VNAU. «Кукурудза - королева полів – 2020» (зб. наук. матеріалів). - Вінниця : ВНАУ, 2020. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://socrates.vsau.org/images/kr2021/k10.pdf>
48. irlen.com.ua. Що таке індекс NDVI: пояснення, приклади. - [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.irlen.com.ua/ndvi-index>
49. Одеський держ. екол. ун-т. Використання NDVI у моніторингу (Михайловський В.В., 2014). - [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://eprints.library.odeku.edu.ua/1379/1/hosenu\\_17\\_2014\\_46.pdf](https://eprints.library.odeku.edu.ua/1379/1/hosenu_17_2014_46.pdf)
50. НУБіП України. Магістерська робота (з тематики кукурудзи): приклад оформлення - дотичні підходи, структура, методи. - 2024. - [Електронний

ресурс]. Режим доступа: <https://dglib.nubip.edu.ua/bitstreams/32cef7ee-d36f-4f9d-80b3-4b1f7b663554/download>

51. Фази розвитку кукурудзи [Електронний ресурс] SuperAgronom.com. -  
Режим доступу: <https://superagronom.com/multimedia/photo/47-vsi-fzi-rozvitku-kukurudzi>

## ДОДАТКИ

### Додаток А



Осот рожевий



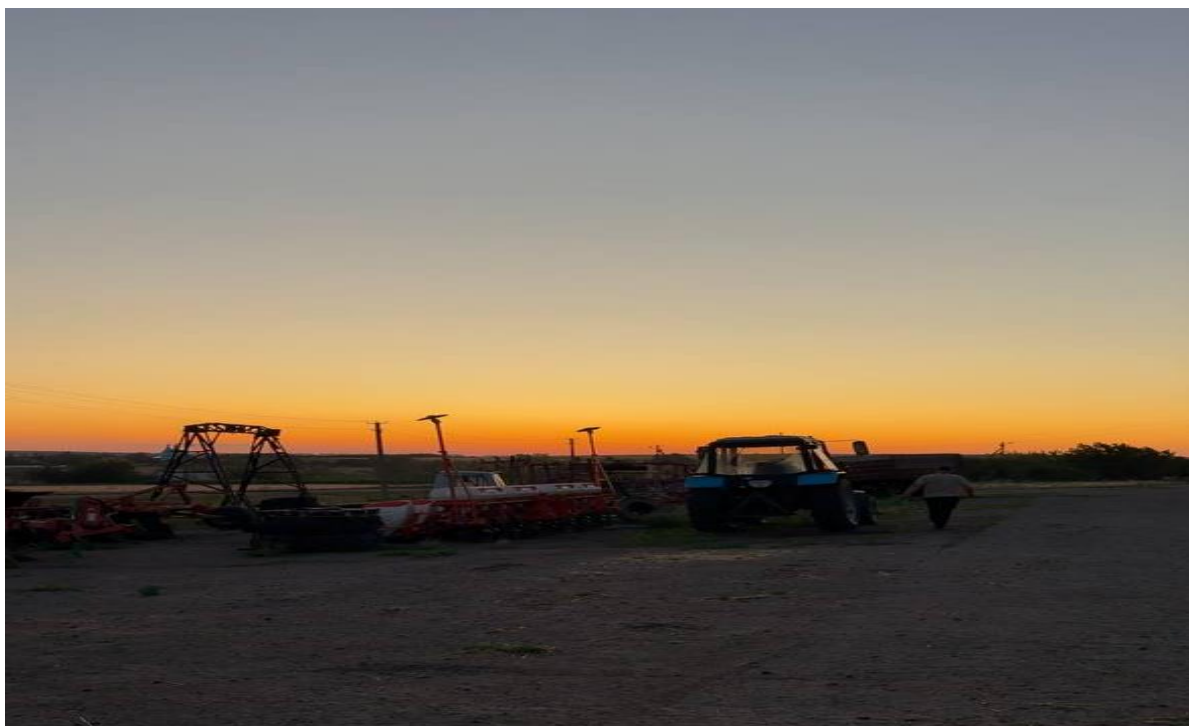
Ваточник сирійський

*Джерело: власні фотоматеріали, 2025 р.*

## Додаток Б



Територія фермерського господарства



Техніка фермерського господарства «Скіф 3»

*Джерело: власні фотоматеріали, 2025 р.*

## Додаток Г



Посіви кукурудзи у фазі 6-8 листків



Кукурудза у фазі активного вегетаційного росту

*Джерело: власні фотоматеріали, 2025 р.*

## Додаток Д

Ділянка	№ качана	Довжина качана, см	Діаметр качана, см	Кількість рядів зерен	Кількість зерен у ряду	Вага качана, г	Вага зерна з качана, г	Вологість, %	Маса 1000
1	1	18	5	18	30	210	161,5	15,5	
1	2	15	4,1	16	25	120	87	14,9	
1	3	18	4,5	16	33	218,9	163,6	15	
1	4	14,5	4	14	23	117,5	82,3	15,5	218
1	5	21	4,5	14	43	250,6	202,1	15,5	
1	6	17	4,5	16	32	176,8	122,2	15	
1	7	17	4	13	28	129,7	90,5	15,3	
2	1	20	4,5	16	41	241	193,9	14	
2	2	20	4,5	16	32	240	179,4	14,5	
2	3	17	4,2	15	30	179,2	143,9	15,3	
2	4	19	4,5	16	39	266,5	220	14,6	249
2	5	18	4,5	18	32	212	165,8	15,5	
2	6	18	4,3	16	32	181,1	143,6	15,1	
2	7	18	4,5	17	28	184,3	140,6	15,3	
3	1	18	4,2	16	36	205,3	168,7	11,9	
3	2	19,5	4,5	16	40	246,2	203,5	14,3	
3	3	19	4,5	16	38	230	174	13,1	
3	4	20	4,7	18	39	262,3	213,8	12	
3	5	20,5	4,5	16	39	256,7	213,4	12,6	240
3	6	18	4,5	16	33	214,9	169,6	12,4	
3	7	21	4,7	16	43	281,3	193,8	12,4	
4	1	20,5	4,5	17	41	273	224,8	15,5	
4	2	19	5	18	41	295,6	248,9	15,3	
4	3	19	4,5	16	40	246,5	204,4	16	
4	4	18,5	4,5	16	38	243	212	16,8	
4	5	19,5	4,5	16	42	252,8	191,6	16,7	292
4	6	18,5	4,5	18	35	247,5	204,7	16,9	
4	7	19	4,6	16	38	249,1	178,8	15,5	
5	1	20	4,9	18	36	286	223,6	14	
5	2	18,5	4,5	16	39	224,1	169,5	13,9	
5	3	20	4,7	18	40	270,6	188,9	15,5	
5	4	21,5	4,5	16	42	282	204,2	14,6	275
5	5	19,5	4,5	16	40	277,7	193,4	14,5	
5	6	19	4,5	16	38	230,6	176,5	14,8	
5	7	20	4,9	18	36	286	167	15	
6	1	21	4,5	16	42	255,5	206,8	12,2	
6	2	20,5	4,7	18	40	268,4	198,9	13,3	
6	3	19	4,4	18	38	238,1	175,6	14	
6	4	19	4,5	16	38	226,8	188,1	13,4	296
6	5	19	4,5	16	40	227,4	189	15,2	
6	6	19	4,4	16	39	187,6	156,8	14,3	
6	7	20	4,6	16	43	258,8	213,6	14,9	

Джерело: власні розрахунки, 2025 р.

## Додаток Ж

## РОЗДІЛ 1. Витрати на виробництво продукції (робіт, послуг) сільського господарства

(тис. грн, з одним десятковим знаком)

Види витрат	Код рядка	Звітний рік
А	Б	1
Прямі матеріальні витрати - усього (із рахунку 23 або із рахунків 23, 80) (>= сумі ряд. 2002,2003,2005 - 2010)	2001	3 216,9
у тому числі		
насіння та посадковий матеріал	2002	959,7
корми	2003	-
із них покупні	2004	-
інша продукція сільського господарства (гній, підстилка, яйця для інкубації)	2005	-
мінеральні добрива	2006	955,3
пальне і мастильні матеріали (нафтопродукти, газ для автомобілів і т. ін.)	2007	792,2
електроенергія	2008	-
паливо й енергія (вугілля, торф, дрова, газ тощо)	2009	-
запасні частини, ремонтні та будівельні матеріали для ремонту	2010	509,7
Прямі витрати на оплату праці (рахунки 47, 66 або рахунки 47, 66, 81)	2011	686,7

Види витрат	Код рядка	Звітний рік
А	Б	1
Інші прямі витрати - усього (>= сумі ряд. 2013-2016)	2012	1 460,3
у тому числі		
відрахування на соціальні заходи (із рахунку 64 або із рахунків 65, 82)	2013	151,1
орендна плата за: земельні частки (паї)	2014	692,5
майнові паї	2015	-
амортизація (рахунки 23, 96 або рахунки 83, 91, 92)	2016	616,7
Загальновиробничі витрати - усього (рахунок 91)	2017	340,0
із них		
оплата послуг сторонніх організацій	2018	270,0
Крім того:		
Адміністративні витрати - усього (із рахунку 96 або із рахунку 92)	2019	8,6

Джерело: звіт з господарства

