

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут економіки, управління, права та
інформаційних технологій
Кафедра інформаційних систем та технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти бакалавр

на тему: «Застосування методів комп'ютерного моделювання та
прогнозування даних в управлінні сільськогосподарським виробництвом
та прийнятті рішень»

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньою програмою
Інформаційні управляючі системи
спеціальності 126 Інформаційні
системи та технології
ступеня вищої освіти бакалавр
групи 126ІСТ_бд_2022
Григорчук Владислав Владиславович
Керівник: Копішинська Олена
Петрівна
Рецензент: Муравльов Володимир
В'ячеславович

Полтава – 2026 року

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут економіки, управління, права та
інформаційних технологій
Кафедра інформаційних систем та технологій

Освітня програма Інформаційні управляючі системи
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій УТКІН
«10» червня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Григорчука Владислава Владиславовича

1. Тема кваліфікаційної роботи:
«Застосування методів комп'ютерного моделювання та прогнозування даних в управлінні сільськогосподарським виробництвом та прийнятті рішень»,
Керівник роботи: к. ф.-м. н., доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій Копішинська Олена Петрівна.
Затверджено наказом закладу вищої освіти від «10» квітня 2026 року № 383-ст
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи «08» червня 2026 року.
3. Вихідні дані до роботи: дані інтернет-ресурсів, пакет аналізу даних Microsoft Excel, Google Sheets, платформа відкритих кліматичних даних Visual Crossing Weather, статистичні дані Держстату, IC (FMS) Soft.Farm
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Розділ 1. Теоретичний огляд процесів цифровізації в управлінні сільськогосподарським виробництвом
Розділ 2. Аналіз методів моделювання агротехнічних даних та застосування в аграрних підприємствах
Розділ 3. Здійснення цифрового аналізу, прогнозування та моніторингу даних галузі рослинництва
5. Перелік графічного матеріалу: схеми, рисунки, діаграми за темою та об'єктом дослідження
6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Оцінювання економічної ефективності результатів дослідження	Дивнич О. Д., к. е. н., доцент, доцент кафедри економіки та публічного управління	01.04.2026 р.	29.05.2026 р.

7. Дата видачі завдання «10» червня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	02.06.2025 р. – 04.06.2025	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	05.06.2025 р. – 10.06.2025 р.	
3	Опрацювання джерел інформації	11.06.2025 р. – 15.06.2025 р.	
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	16.06.2025 р. – 20.06.2025 р.	
5	Виконання теоретико-методологічного розділу роботи	08.09.2025 р. – 01.11.2025 р.	
6	Виконання дослідницько-аналітичного розділу роботи	19.01.2026 р. – 14.02.2026 р.	
7	Виконання проєктно-рекомендаційного розділу роботи	16.02.2026 р. – 31.03.2026 р.	
8	Оцінювання економічної ефективності результатів дослідження	01.04.2026 р. – 29.05.2026 р.	
9	Оформлення тексту роботи	01.06.2026 р. – 06.06.2026р.	
10	Попередній захист роботи на кафедрі	08.06.2026 р.	
11	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	09.06.2026 р. – 10.06.2026 р.	
12	Нормоконтроль	11.06.2026 р. – 15.06.2026 р.	
13	Захист кваліфікаційної роботи	16.06.2026 р. - 19.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

Владислав ГРИГОРЧУК

Керівник роботи

Олена КОПШИНСЬКА

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОЦЕСІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В УПРАВЛІННІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИМ ВИРОБНИЦТВОМ	9
1.1 Вплив технологій Агрокультури 4.0 на управління сільськогосподарським виробництвом	9
1.2 Впровадження точного землеробства та стійкі продовольчі системи як стратегія досягнення цілей сталого розвитку	13
1.3 Завдання та функціональні складові спеціалізованих інформаційних систем для автоматизації управління сільськогосподарським виробництвом ...	18
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ І МОДЕЛЮВАННЯ ДАНИХ ТА ЗАСТОСУВАННЯ В АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	24
2.1 Особливості роботи з масивами даних в агропідприємствах при впровадженні та застосуванні інформаційних систем	24
2.2 Методи лінійного програмування в задачах оптимізаційного моделювання аграрного виробництва	29
2.3 Оптимізація виробничих процесів у рослинництві із застосуванням LP- моделей та систем Farm Management System	37
РОЗДІЛ 3 ЗДІЙСНЕННЯ ЦИФРОВОГО АНАЛІЗУ, ПРОГНОЗУВАННЯ та МОНІТОРИНГУ ДАНИХ ГАЛУЗІ РОСЛИННИЦТВА	43
3.1 Виклад результатів цифрової аналітики погодних даних та визначення впливу на коливання показників урожайності	43
3.2 Створення електронних карт для агрозон спеціального впливу на основі агроскаутингу	51
3.3 Економічне обґрунтування впровадження систем цифрового управління аграрним виробництвом на прикладі Soft.Farm	56
ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63
ДОДАТКИ	70

ВСТУП

Вибір напрямку теоретичних досліджень та пошук ефективних прикладних рішень кваліфікаційної роботи розглядається в контексті слідування цілям сталого розвитку, зокрема, таких, як забезпечення населення планети продовольством, збереження природних ресурсів. Сучасний розвиток сільського господарства характеризується високим рівнем залежності від природно-кліматичних умов, ринкової кон'юнктури та швидкості прийняття управлінських рішень. Зростання мінливості погодних умов, частоти посух, температурних аномалій та інших кліматичних ризиків суттєво впливає на стабільність агровиробництва і потребує впровадження нових підходів до аналізу та прогнозування даних.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи пов'язується з тим, що в сучасних умовах особливого значення набуває використання методів комп'ютерного моделювання, які дозволяють здійснювати оцінювання тенденцій, прогнозування врожайності та підтримку прийняття рішень на основі статистичних даних. На сьогодні для аналізу аграрних процесів активно застосовуються спеціалізовані інформаційні системи, технології точного землеробства, супутниковий моніторинг, геоінформаційні системи та методи машинного навчання [1]. Однак, впровадження таких рішень часто потребує значних фінансових витрат, наявності спеціалізованого обладнання та фахівців відповідної кваліфікації. Для малих і середніх фермерських господарств використання дорогих програмних платформ не завжди є економічно доцільним або технічно доступним.

У зв'язку з цим актуальності набуває використання традиційних методів аналізу даних на основі доступного офісного програмного забезпечення, зокрема Microsoft Excel та Google Sheets. Табличні процесори забезпечують можливість виконання статистичного аналізу, побудови кореляційних і регресійних моделей, виявлення трендів, аналізу погодних аномалій та прогнозування показників без необхідності використання складних спеціалізованих систем. Важливою

перевагою таких інструментів є їх доступність, простота використання та можливість працювати з відкритими наборами даних.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження можливостей застосування методів комп'ютерного моделювання та прогнозування даних для підтримки управління сільськогосподарським виробництвом і прийняття рішень на основі статистичного аналізу кліматичних та агровиробничих показників із використанням табличних процесорів та інших цифрових рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі *завдання*:

- дослідити роль статистичного аналізу та прогнозування у прийнятті управлінських рішень у сільському господарстві.
- охарактеризувати можливості табличних процесорів для аналізу аграрних даних;
- виконати аналіз відкритих наборів метеорологічних та статистичних даних;
- реалізувати експерименти з оцінювання погодніх аномалій та їх впливу на врожайність сільськогосподарських культур;
- побудувати кореляційні та регресійні моделі із використанням функцій CORREL(), LINEST(), FORECAST.LINEAR();
- порівняти методології моніторингу стану рослин із бору даних засобами агроскаутингу інструментами спеціалізованих інформаційних систем;
- оцінити ефективність використання традиційних методів аналізу даних для підтримки прийняття рішень у сільськогосподарському виробництві;
- сформулювати практичні рекомендації щодо використання табличних процесорів для прогнозування аграрних показників.

Об'єктом дослідження є процеси аналізу, моделювання та прогнозування статистичних показників у системі управління сільськогосподарським виробництвом.

Предметом дослідження є методи комп'ютерного аналізу, статистичного моделювання та прогнозування аграрних показників на основі кліматичних і виробничих даних із використанням засобів табличного аналізу.

Методи дослідження. Для аналізу теоретичних аспектів застосовано методи узагальнення, систематизації та порівняння наукових джерел. Для обробки статистичних даних використано методи описової статистики, кореляційного та регресійного аналізу. Виявлення тенденцій і погодних аномалій здійснювалося за допомогою методів часових рядів та ковзного середнього. Для побудови прогнозних моделей застосовано методи лінійної регресії та статистичного прогнозування. Для обробки даних агроскаутингу використано графічний метод.

Інформаційну базу кваліфікаційної роботи становлять матеріали наукових публікацій, представлених у науково-метричних базах даних, статистичні та метеорологічні дані з відкритих джерел, а також аналітичні дані аграрних інформаційних платформ. У роботі використано відкриті набори кліматичних спостережень, статистику врожайності сільськогосподарських культур, матеріали наукових конференцій, присвячених цифровізації аграрного сектору.

Практична значущість роботи базується на результатах власних розрахунків автора, виконаних із використанням методів статистичного аналізу, кореляційного та регресійного моделювання на основі відкритих агрокліматичних даних. Практична частина виконувалася із використанням табличних процесорів Microsoft Excel та Google Sheets, а також відкритих наборів метеорологічних і статистичних даних. Для автоматизації обчислень використовувалися вбудовані функції статистичного аналізу, зокрема AVERAGE(), STDEV(), IF(), TREND(), CORREL(), LINEST() та FORECAST.LINEAR(). Результати можуть бути основою для розрахунків базових показників у будь-яких агропідприємствах.

Апробація результатів дослідження відбувалася шляхом представлення доповіді на студентській науково-практичній конференції.

Структура і обсяг кваліфікаційної роботи: пояснювальна записка викладена на 62 сторінках і складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 65 найменувань. Робота включає 4 таблиці, 18 рисунків, додатки.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОЦЕСІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В УПРАВЛІННІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИМ ВИРОБНИЦТВОМ

1.1 Вплив технологій Агрокультури 4.0 на управління сільськогосподарським виробництвом

Протягом останніх десятиліть цифрові технології стали одним із ключових факторів трансформації економіки та виробничих процесів у більшості галузей промисловості. Активний розвиток інформаційних систем (ІС), технологій автоматизації, хмарних сервісів, аналітики даних та штучного інтелекту формує нові підходи до управління підприємствами, прийняття рішень та організації виробництва. Сільське господарство, яке традиційно характеризувалося високою залежністю від природно-кліматичних умов та присутністю ручної праці, також поступово інтегрується в процеси цифрової трансформації. Однак, впровадження цифрових рішень в аграрному секторі відбувається нерівномірно через специфіку галузі, значні фінансові витрати на технологічне оновлення, недостатній рівень цифрової підготовки окремих виробників та складність інтеграції інформаційних систем у виробничі процеси [2].

Розвиток сільськогосподарського виробництва історично пройшов кілька етапів технологічної модернізації. Механізація початку ХХ століття забезпечила скорочення фізичної праці та підвищення продуктивності фермерських господарств. Наступним етапом стала «зелена революція», яка сприяла значному підвищенню продуктивності завдяки використанню нових сортів сільськогосподарських культур, мінеральних добрив та засобів захисту рослин (ЗЗР). Водночас, інтенсивне використання традиційних сільськогосподарських технологій призвело до низки екологічних проблем, зокрема деградації ґрунтів, виснаження водних ресурсів та збільшення антропогенного тиску на навколишнє середовище. Сьогодні аграрний сектор переживає новий етап трансформації, який пов'язаний з переходом до концепції Агрокультури 4.0 (Agriculture 4.0).

У 2018 р. відбувся міжнародний саміт на рівні урядів, за результатами якого був опублікований фундаментальний звіт «Agriculture 4.0 – the future of farming technology» [3]. Основною особливістю сучасного періоду визначено перехід від традиційного управління до управління на основі даних (data-driven management), де рішення формуються на основі постійного збору, обробки та аналізу інформації. (рис. 1.1).

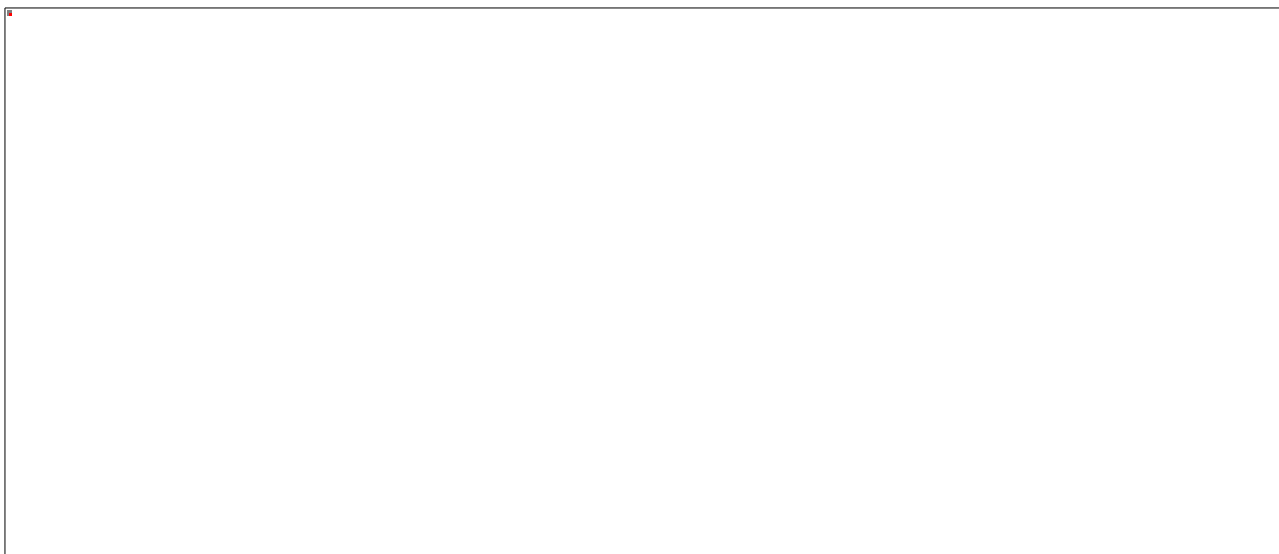


Рисунок 1.1 – Мапа поєднання ключових технологій Агрокультури 4.0 [3]

Згідно зі світовими тенденціями, сучасне агровиробництво дедалі активніше використовує технології точного землеробства, системи глобального позиціонування GPS від (англ. Global Positioning System), сенсори температури та вологості, безпілотні літальні апарати, супутниковий моніторинг, роботизовані комплекси та хмарні інформаційні платформи [4].

Особливого значення набувають інформаційні системи, які забезпечують автоматизований збір даних безпосередньо з місць виробництва, їх централізоване зберігання та подальший аналіз. У сучасних умовах ефективне управління сільськогосподарським виробництвом неможливе без оперативного контролю за погодними умовами, станом ґрунтів, рівнем вологості, динамікою росту рослин та іншими параметрами. Використання цифрових технологій дозволяє підвищити точність управлінських рішень, оптимізувати використання ресурсів і мінімізувати виробничі ризики [5-6]. Важливою особливістю

технологій Агрокультури 4.0 є інтеграція різних типів даних – метеорологічних, виробничих, статистичних, геопросторових та економічних у єдине інформаційне середовище. Це створює передумови для застосування методів комп'ютерного моделювання та прогнозування, які дозволяють оцінювати можливі сценарії розвитку виробничих процесів, аналізувати ризики та прогнозувати врожайність сільськогосподарських культур. Саме тому технології аналізу даних стають одним із ключових елементів сучасного аграрного менеджменту.

Разом із тим, перехід до Агрокультури 4.0 не обмежується лише автоматизацією збору даних або впровадженням окремих цифрових пристроїв. Йдеться про формування комплексної екосистеми управління, у якій інформаційні системи забезпечують взаємодію між виробничими процесами, аналітичними платформами та засобами підтримки прийняття рішень. У межах такого підходу особливу роль відіграють технології хмарних обчислень, Інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data), машинного навчання та аналітичних платформ (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Становлення автономії агровиробництва у співставленні з різними історичними рівнями розвитку традиційних і цифрових технологій [7]

Сучасні цифрові технології також сприяють підвищенню прозорості

агропродовольчих ланцюгів і забезпечують можливість відстеження походження продукції. Це є важливим фактором підвищення довіри споживачів, контролю якості та забезпечення продовольчої безпеки. Крім того, цифровізація аграрного сектору створює умови для реалізації концепції сталого розвитку, оскільки дозволяє більш раціонально використовувати природні ресурси, зменшувати екологічне навантаження та оптимізувати енергоспоживання [7].

Водночас впровадження технологій Агрокультури 4.0 супроводжується низкою проблем. До основних належать висока вартість спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення, складність інтеграції різнорідних інформаційних систем, потреба у кваліфікованих кадрах та недостатній рівень цифрової інфраструктури в окремих регіонах. Особливо актуальними ці проблеми є для малих і середніх фермерських господарств, які часто не мають достатніх фінансових ресурсів для повноцінного впровадження сучасних цифрових платформ [8].

У зв'язку з цим важливого значення набуває використання доступних інструментів комп'ютерного аналізу та прогнозування даних, які можуть бути реалізовані навіть без дорогих спеціалізованих систем. Зокрема, застосування табличних процесорів Microsoft Excel та Google Sheets дозволяє виконувати базовий статистичний аналіз, будувати кореляційні та регресійні моделі, аналізувати погодні аномалії та прогнозувати врожайність на основі відкритих наборів даних. Таким чином, навіть традиційні засоби обробки інформації можуть виступати ефективним елементом підтримки управлінських рішень у системі сучасного агровиробництва.

Таким чином, цифрові технології та принципи Агрокультури 4.0 створюють умови для досягнення балансу між підвищенням продуктивності аграрного виробництва, забезпеченням зайнятості та дотриманням принципів сталого розвитку (рис. 1.3). Їх застосування дозволяє не лише збільшувати ефективність виробництва продовольства, але й зменшувати економічні та екологічні ризики.



Рисунок 1.3 – Трикутник балансу в інтервенції технологій для аграрного виробництва

У зв'язку з цим важливого значення набуває використання доступних інструментів комп'ютерного аналізу та прогнозування даних, які можуть бути реалізовані навіть без дорогих спеціалізованих систем. Зокрема, застосування табличних процесорів Microsoft Excel та Google Sheets дозволяє виконувати базовий статистичний аналіз, будувати кореляційні та регресійні моделі, аналізувати погодні аномалії та прогнозувати врожайність на основі відкритих наборів даних.

Отже, технології Агрокультури 4.0 суттєво змінюють підходи до управління сільськогосподарським виробництвом, переводячи його від традиційних методів до цифрових моделей управління на основі даних.

1.2 Впровадження точного землеробства та стійкі продовольчі системи як стратегія досягнення цілей сталого розвитку

На сучасному етапі сільське господарство виходить далеко за межі традиційного виробництва продуктів харчування та розглядається як складова агропродовольчих систем (АС), які являють собою комплекс взаємодій між людьми, технологіями та природними ресурсами, що забезпечують повний цикл від виробництва до споживання продовольства. Такі системи характеризуються

складною структурою та залежать від багатьох чинників, серед яких кліматичні умови, стан ґрунтів, водних ресурсів, рівень розвитку технологій, економічні та політичні умови, а також соціокультурні особливості [10].

Агропродовольчі системи можуть бути класифіковані за різними критеріями залежно від способу організації виробництва, рівня технологічності та екологічної орієнтації.

1. Традиційні АС переважно базуються на місцевих знаннях, історично сформованих практиках та забезпечують виробництво харчових продуктів для місцевого споживання. В Україні до таких систем належать малі та середні фермерські господарства, спеціалізовані ферми або змішані агровиробничі комплекси.

2. Екоорієнтовані АС базуються на принципах органічного виробництва та сталого розвитку. Їхньою особливістю є мінімізація негативного впливу на довкілля та дотримання екологічних стандартів під час виробництва продукції. Популярність органічного виробництва в Україні та світі постійно зростає завдяки підвищеному попиту на екологічно чисту продукцію та її високій ринковій вартості.

3. Інтенсивні системи спрямовані на отримання максимальної продуктивності завдяки активному використанню сучасного обладнання, добрив, засобів захисту рослин та високоврожайних сортів і гібридів сільськогосподарських культур.

4. Промислові виробничі системи орієнтовані на масове виробництво продуктів харчування з використанням промислових методів організації праці та високопродуктивних технологій.

Важливу роль у формуванні сучасних підходів до розвитку агропродовольчих систем відіграє Food and Agriculture Organization of the United Nations, яка реалізує програму «Стійкі продовольчі системи» (*Sustainable Food Systems, SFS*). Ця програма є багатостороннім партнерством, спрямованим на прискорення трансформації продовольчих систем як ключової стратегії досягнення цілей сталого розвитку [11].

Програма SFS передбачає застосування системного підходу до управління АС, який враховує взаємозв'язки між усіма елементами та учасниками виробничо-продовольчого ланцюга. Такий підхід сприяє формуванню узгодженої державної політики та комплексному вирішенню проблем продовольчої безпеки, ефективного використання ресурсів і збереження навколишнього середовища.

Результати глобального моніторингу свідчать, що сучасний рівень розвитку аграрного виробництва дозволяє забезпечити населення світу достатньою кількістю продовольства. Водночас близько 30 % виробленої їжі втрачається або використовується неефективно, тоді як значна частина населення планети продовжує страждати від нестачі продовольства [12]. Це зумовлює необхідність глибокої трансформації існуючих продовольчих систем з метою підвищення їх стійкості, ефективності та соціальної справедливості.

Одним із ключових напрямів такої трансформації є впровадження цифрових технологій і систем точного землеробства. Технологічна модернізація сільського господарства здійснюється шляхом автоматизації виробничих процесів та використання цифрових рішень для підтримки прийняття управлінських рішень. Дані про стан ґрунтів, погодні умови, вологість, врожайність та ринкові ціни дозволяють агровиробникам оперативно реагувати на зміни зовнішнього середовища та підвищувати ефективність виробництва.

Очікується, що автономне та цифровізоване землеробство забезпечить формування більш стійких моделей «від ферми до столу» завдяки постійному моніторингу полів, посівів, техніки й погодних умов у режимі реального часу. Серед основних напрямів використання цифрових технологій у сільському господарстві виділяють:

- оптимізацію маршрутів руху техніки;
- автоматизоване планування польових робіт;
- контроль використання техніки під час оранки, культивації та збирання врожаю;
- зниження операційних витрат;

- моніторинг врожайності в реальному часі;
- удосконалення логістики агровиробництва [13].

Сучасні цифрові агротехнології пеєрдбачають інтеграцію з мережами 5G, системами штучного інтелекту (ШІ), хмарними сервісами та технологіями Інтернету речей (Internet of Things, IoT). Використання автономної техніки, інтелектуальних систем зрошення та аналітики великих даних дозволяє мінімізувати людський фактор, скоротити витрати ресурсів і підвищити точність виконання агротехнологічних операцій.

Важливе місце в сучасних агропродовольчих системах посідає концепція точного землеробства. Сутність точного землеробства (ТЗ), за висновками авторів книги [14] полягає в стратегії сталого інтенсивного господарювання, яка базується на врахуванні просторової та часової неоднорідності ґрунтового покриву та стану посівів. Науковці трактують точне землеробство не просто як набір цифрових технологій, а як цілісну систему сталого менеджменту, де кожен агротехнічний захід виконується в потрібному місці, у потрібний час і з необхідною інтенсивністю [15].

Розвиток технологій точного землеробства розпочався у 1980-х роках у країнах Західної Європи, Північної Америки та Японії з появою перших електронних систем збору даних і супутникової навігації. У 1992 році були створені перші системи моніторингу врожайності з географічною прив'язкою, а в 1996 році здійснено перші випробування автоматичного водіння трактора за сигналами GPS [16]. В Україні технології точного землеробства почали активно впроваджуватися на початку 2000-х років переважно великими агрохолдингами, які мали достатні фінансові ресурси для інвестування у сучасне обладнання та цифрову інфраструктуру [17].

Однією з ключових складових точного землеробства є управління інформаційними потоками, що включає збір, передавання, зберігання та аналіз великих обсягів даних. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється методам обробки великих даних (Big Data) для підтримки прийняття управлінських рішень у сільському господарстві [18]. Наявність сучасного

програмного й апаратного забезпечення, відкритих джерел даних і аналітичних інструментів створює передумови для активного розвитку цифрового агросектору.

У контексті точного землеробства під смарт-технологіями розуміють комплекс інноваційних рішень, які включають використання безпілотних літальних апаратів, IoT-датчиків, супутникових систем, технологій штучного інтелекту та спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу аграрних даних [19]. У сучасній науковій літературі такі підходи часто об'єднуються поняттями «digital farming» або «Agriculture 4.0», що відображають процес цифрової трансформації аграрного сектору [20, 21].

Інтегрований досвід провідних країн світу свідчить, що точне землеробство має значний потенціал для підвищення продуктивності рослинництва, зменшення ресурсних витрат і зниження негативного впливу агровиробництва на довкілля. Наукові дослідження у цій сфері підтверджують, що базовою передумовою впровадження технологій точного землеробства є визнання неоднорідності ґрунтового покриття та агробіологічних характеристик поля [22, 23].

Для збору, аналізу та моніторингу даних використовуються сучасні технології, зокрема:

- системи глобального позиціонування GPS;
- геоінформаційні системи (GIS);
- технології оцінювання врожайності;
- технології змінного нормування;
- дистанційне зондування Землі за допомогою супутників і агродронів;
- рішення на основі технологій IoT [24–26].
- Основними напрямками застосування точного землеробства є:
 - агрономічний, який передбачає оптимізацію внесення добрив і засобів захисту рослин відповідно до реальних потреб культур;
 - технічний, спрямований на вдосконалення управління сільськогосподарською технікою та планування польових робіт;

- – екологічний, що забезпечує зменшення негативного впливу агровиробництва на навколишнє середовище;
- – економічний, орієнтований на підвищення продуктивності та зниження виробничих витрат.

Таким чином, точне землеробство є комплексною високотехнологічною системою управління аграрним виробництвом, яка поєднує сучасні цифрові технології, аналітичні методи та практичний досвід агровиробників. Перехід до моделей Agriculture 4.0 є поступовим процесом, що потребує інтеграції різноманітних технологій, систем збору й аналізу даних, а також використання сучасних інформаційних систем підтримки прийняття рішень [27].

1.3 Завдання та функціональні складові спеціалізованих інформаційних систем для автоматизації управління сільськогосподарським виробництвом

Впровадження технологій Агроіндустрії 4.0, зокрема технологій великих даних (Big Data) та штучного інтелекту (ШІ), значною мірою ґрунтується на попередній цифровізації процесів збору та обробки інформації. Це означає, що на аграрному підприємстві має бути організований системний облік виробничих процесів, а також функціонувати мережа датчиків і пристроїв для автоматизованого збору даних. Фактично йдеться про досягнення рівня цифровізації, який відповідає концепції Agriculture 3.0 та реалізується через системи точного землеробства.

Водночас аграрний сектор характеризується певною інерційністю щодо впровадження інноваційних технологій. Аналіз основних обмежувальних факторів, які стримують цифрову трансформацію аграрного виробництва, наведений у низці наукових досліджень [28]. До таких факторів належать:

- технічні обмеження, пов'язані з неоднорідністю зон управління та складністю інтеграції польових масивів [29];

- недостатня готовність підприємств до централізованої обробки великих обсягів даних, отриманих із датчиків, супутників, дронів та інших джерел;
- низька якість або обмежений доступ до мережі Інтернет у сільській місцевості;
- недостатній рівень цифрової компетентності персоналу;
- організаційна неготовність підприємств до змін.

Дослідники підкреслюють, що ключовою перешкодою цифровізації аграрного сектору є не стільки технологічні чи фінансові чинники, скільки організаційна культура підприємств та готовність персоналу до впровадження інновацій [30]. Для України ця проблема є особливо актуальною [31].

Важливим інструментом цифрової трансформації аграрного виробництва є спеціалізовані для аграріїв інформаційні системи класу Farm Management System (FMS). Основною метою впровадження таких ІС є підвищення ефективності, продуктивності та конкурентоспроможності аграрного виробництва шляхом автоматизації процесів управління агроєкосистемами.

Використання FMS дозволяє оптимізувати:

- вибір сортів і гібридів культур;
- планування посівних робіт;
- внесення добрив і засобів захисту рослин;
- моніторинг стану посівів;
- контроль технологічних операцій;
- прогнозування врожайності;
- управління збиранням урожаю та логістикою.

У результаті зазначені фактори сприяють підвищенню якості продукції, зменшенню виробничих витрат, раціональному використанню ресурсів та зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Разом із тим, практика використання FMS свідчить про наявність низки проблем, пов'язаних із неповним або неефективним використанням функціональних можливостей таких систем. На багатьох аграрних підприємствах FMS застосовуються переважно як інструмент обліку ресурсів і

фінансових операцій, тоді як аналітичні модулі, системи прогнозування, моніторингу посівів та підтримки прийняття рішень залишаються недостатньо задіяними. Статистичний аналіз показав, що найбільш поширеними функціями FMS є облік ресурсів і фінансів, які реалізовані у 17 із 38 досліджених систем, тоді як модулі прогнозування врожайності, погодної аналітики та управління вирощуванням культур представлені лише у 7 із 38 систем [30]. Таким чином, значна частина підприємств використовує лише базовий функціонал FMS, не реалізуючи повною мірою потенціал цифрового управління агровиробництвом.

Орієнтовний перелік модулів та їх функціоналу наведено на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Ієрархічна діаграма складових FMS

Слід також відмітити, окремі FMS-рішення мають обмежений функціонал або недостатню інтеграцію з іншими цифровими платформами, що ускладнює формування єдиного інформаційного середовища підприємства. На практиці спостерігаються випадки некоректного використання модулів системи, дублювання даних або порушення принципів ведення цифрового обліку, що негативно впливає на якість аналітики та ефективність управлінських рішень.

У табл. 1.1 показана таблиця-матриця у форматі Business Canvas. Кожен стовпець представляє окрему вертикаль управління, де вказано об'єкти, методи автоматизації та фінальний KPI (результат) [30].

Таблиця 1.1 – Модель зв'язку модулів, об'єктів, методів та результатів FMS

Модулі	Земельний банк	Технічно-матеріальні цінності (ТМЦ)	Техніка	Інформація
Об'єкти	- Поля - Земельні ділянки - Договори оренди	- Посівний матеріал - Добрива та ЗЗР - Паливо	- Геометрія руху - Норми операцій - Моніторинг виконання	- Дані про ґрунти - Метеодані та урожайність
Методи	- GIS-системи - CRM - Агродрони	- Мобільний агроном - Автоматизація АЗС/вагових - GPS-моніторинг	- Паралельне водіння - Контроль висіву/виливу - Управління нормами	- Супутниковий моніторинг - Метеосервіси - Farm Management
Результат	Капіталізація Консолідація земель та зменшення ризиків	Контроль активів Зниження витрат та оперативність рішень	Ефективність Дотримання технологій та ріст EBITDA	Передача знань Єдине інформаційне поле компанії

Таким чином, сучасні FMS повинні охоплювати всі виробничі та технологічні процеси аграрного підприємства, інтегруючи модулі дистанційного моніторингу, погодної аналітики, управління земельним банком, контролю техніки, планування виробничих операцій та аналізу агрономічних даних. Більшість сучасних систем реалізують зазначений функціонал у вигляді окремих спеціалізованих модулів.

У наукових дослідженнях [28] обґрунтовано необхідність використання FMS як єдиної платформи управління потоками даних у рослинництві. Функціональні можливості найбільш поширених рішень для аграрного сектору, зокрема, FieldView™ від Bayer [32], Soft.Farm [33], Cropwise Operations від Syngenta [34], мають схожий набір виробничих модулів, орієнтованих на автоматизацію агротехнологічних процесів.

Основні модулі FMS можна об'єднати у такі групи:

- модулі управління земельними ресурсами;
- модулі моніторингу полів на основі супутникових даних;
- модулі планування та контролю польових робіт;

- модулі обліку ресурсів і техніки;
- аналітичні та прогнозні модулі.

У сучасних умовах найбільш перспективними є хмарні інформаційні системи, побудовані за моделлю Software as a Service (SaaS). Перевагами таких рішень є:

- доступність із будь-якого місця через мережу інтернет;
- централізоване зберігання великих обсягів даних;
- зниження витрат на локальну IT-інфраструктуру;
- масштабованість і гнучкість;
- спрощення інтеграції різних підсистем.

Архітектура сучасних FMS, заснованих на хмарних технологіях, є модернізованим варіантом клієнт-серверної архітектури, де обробка та зберігання даних здійснюються на віддалених серверах, а доступ користувачів реалізується через вебінтерфейси або мобільні застосунки [35].

На рис. 1.5 представлено фрагмент головної сторінки IC Soft.Farm, на якій можна бачити повний склад розділу «Рослинництво».



Рисунок 1.5 – Модульний склад розділу «Рослинництво» IC Soft.Farm [33]

Впровадження ІС в аграрному секторі повинно враховувати регіональні особливості, рівень технічного забезпечення підприємств, потреби користувачів, наявність інфраструктури та фінансових ресурсів. Водночас ефективна FMS має

базуватися на добре спроектованій базі даних, бути масштабованою, гнучкою та забезпечувати зручний доступ до інформації для різних категорій користувачів [36].

Важливою перевагою сучасних цифрових платформ є можливість інтеграції різнорідних програмно-апаратних комплексів у єдине інформаційне середовище підприємства. Це особливо актуально для аграрних холдингів, у яких використовується техніка різних виробників та різні спеціалізовані інформаційні системи [37].

Сучасні підходи до інтеграції виробничих систем базуються на міжнародних стандартах ISA-88 (IEC 61512) та ISA-95 (IEC 62264), які широко застосовуються для інтеграції систем класу АСУТП, MES та ERP [38]. Використання таких стандартів забезпечує підвищення сумісності систем, покращення простежуваності виробничих процесів та оптимізацію витрат.

Для аграрного сектору України це має особливе значення у контексті розвитку експортного потенціалу та адаптації до вимог країн Європейського Союзу щодо прозорості й простежуваності виробництва агропродукції.

Отже, перспективним напрямом розвитку аграрного виробництва є формування комплексних цифрових платформ управління на основі концепції Агроіндустрії 4.0, які забезпечують інтеграцію даних, автоматизацію виробничих процесів та підтримку прийняття управлінських рішень.

Подальшими завданнями дослідження є вибір ефективних методів обробки великих масивів даних в агросистемах, аналіз прогностичних показників, прогнозування кліматичних параметрів та їх впливу на врожайність, а також цифровий моніторинг ключових показників у рослинництві з подальшою обробкою даних у спеціалізованій інформаційній системі типу FMS.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ І МОДЕЛЮВАННЯ ДАНИХ ТА ЗАСТОСУВАННЯ В АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

2.1 Особливості роботи з масивами даних в агропідприємствах при впровадженні та застосуванні інформаційних систем

Для досягнення мети та виконання завдань кваліфікаційної роботи необхідно розглянути основні типи даних, які збираються й обробляються впродовж виробничих циклів вирощування сільськогосподарських культур в агропідприємствах незалежно від їх типу та масштабу діяльності. Подальшим етапом є вибір раціональних методологій обробки таких даних із використанням сучасних програмних комплексів та інформаційних систем.

З позиції управління точне землеробство часто визначається як *soil-specific farming* – «грунтоорієнтоване землеробство», основною метою якого є оптимізація використання ресурсів шляхом диференційованого управління ґрунтами та посівами. Такий підхід спрямований на підвищення врожайності, зменшення виробничих витрат та забезпечення максимальної ефективності агровиробництва. Центральне місце в системі точного землеробства займають моніторинг показників, прогнозування та агроскаутинг, оскільки саме вони формують основу для прийняття рішень, заснованих на аналізі даних, а не на інтуїтивних оцінках.

Сучасні технології вирощування сільськогосподарських культур, які характеризуються як ресурсоощадні та ґрунтозахисні, є складовими індустріального підходу до агровиробництва. Його сутність полягає у постійному спостереженні за станом рослин упродовж усього періоду вегетації – від висіву до збирання врожаю. Агрономи, біологи та інші фахівці здійснюють моніторинг розвитку культур, аналізують вплив шкідників, хвороб і стресових факторів, а у разі виявлення відхилень проводять коригування агротехнологічних заходів шляхом внесення добрив, засобів захисту рослин або

зміни технологічних параметрів обробітку. При цьому всі виконані операції фіксуються в інформаційних системах та накопичуються у відповідних базах даних [39].

Ключовими показниками ефективності агросистем є врожайність та рентабельність виробництва. Тому особливу увагу доцільно приділяти аналізу врожайності, кліматичних факторів, параметрів ґрунту та методів збору відповідних даних, а також автоматизації процесів управління й аналітичної обробки інформації в межах створеної бази даних.

Урожайність сільськогосподарських культур є інтегрованим показником, який визначається густотою стояння рослин і їх середньою продуктивністю. Значення цього показника залежить як від генетичних особливостей культури, так і від забезпеченості рослин основними факторами середовища, насамперед вологою, теплом, елементами мінерального живлення та аерацією ґрунту. Облік таких факторів ведеться для окремих земельних ділянок або полів господарства, що формує значні масиви просторово-орієнтованих даних.

До основних факторів, які впливають на реалізацію потенціалу рослин, належать:

- погодні умови;
- характеристики ґрунту;
- вибір насіннєвого матеріалу;
- підготовка ґрунту;
- технологія сівби;
- система розподілу води;
- управління поживними речовинами;
- моніторинг посівів у період вегетації;
- боротьба зі шкідниками, хворобами та бур'янами;
- технології збирання врожаю.

Важливими складовими точного землеробства при цьому виступають електронні карти, дистанційний моніторинг, погодні станції, технології моделювання ризиків, аналітичні та управлінські рішення. На всіх етапах

виробничого циклу доцільним є використання сучасних інформаційних технологій – від окремих систем точного землеробства до комплексних платформ Agriculture 4.0.

До основних факторів, які впливають на реалізацію потенціалу рослин, належать:

Розвиток телекомунікаційних технологій, цифрових платформ та методів збору й обробки інформації створює передумови для формування принципово нових програмних комплексів, здатних інтегрувати знання та практичний досвід фахівців у галузях агрономії, біології, економіки та інформаційних технологій [40]. Основною метою впровадження інформаційних систем в агрономії є підвищення продуктивності агроecosистем та забезпечення підтримки технологій точного землеробства.

Сучасні інформаційні технології дозволяють автоматизувати процеси збору, обробки, аналізу та передавання даних про:

- стан ґрунту;
- розвиток рослин;
- кліматичні умови;
- виконання технологічних операцій;
- ринкові фактори;
- використання ресурсів.

На основі отриманих даних агрономи можуть оптимізувати вибір сортів, планування посівів, внесення добрив і засобів захисту рослин, що в комплексі забезпечує підвищення якості продукції, скорочення витрат ресурсів та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище.

Процес впровадження та використання систем класу Farm Management System (FMS) розпочинається зі створення баз даних та організації збору первинної інформації про поля. Для цього використовуються сучасні методи дистанційного зондування, серед яких:

- супутникові знімки;
- аерофотозйомка;

- агродрони;
- збиральна техніка із системами моніторингу врожайності;
- автоматичні ґрунтові пробовідбірники з GPS-прив'язкою.

Усі отримані дані формуються у структуровані масиви та пов'язуються з іншими виробничими операціями в межах інформаційної системи. Більшість сучасних FMS забезпечують можливість редагування, доповнення та інтеграції таких даних із суміжними модулями.

Основними типами даних, що формують відношення баз даних аграрних інформаційних систем, є такі.

1. Дані про поля та земельний банк. Для формування бази даних використовуються результати інвентаризації полів, визначення меж земельних ділянок та побудови електронних карт. Джерелами даних є супутникові знімки, аерофотозйомка та GPS-вимірювання. На основі цих даних створюються тематичні електронні карти та довідники.

2. Дані про врожайність. Інформація про врожайність включає побудову карт урожайності та вологості зерна. Для цього застосовуються комбайни, обладнані системами моніторингу врожайності, які містять GPS-приймачі, бортові комп'ютери, датчики маси та вологості зерна. Дані реєструються через певні часові інтервали та використовуються для подальшого аналізу продуктивності окремих зон поля.

3. Дані про зони продуктивності. Зона продуктивності визначається як частина поля, що характеризується відмінностями у типі ґрунту, рівні вологості, рельєфі, агрохімічних показниках та продуктивності. Для формування зон продуктивності використовуються:

- характеристики ґрунту;
- показники електропровідності;
- вміст гумусу;
- рельєф місцевості;
- багаторічні карти врожайності;
- результати агрохімічного аналізу.

Водночас повна автоматизація формування зон продуктивності часто ускладнюється через несумісність програмного забезпечення та обладнання різних виробників. Саме тому великі агрохолдинги формують власні інтегровані цифрові платформи або використовують гнучкі системи з відкритими API, зокрема Soft.Farm. Для невеликих господарств доцільним залишається використання універсальних інструментів обробки даних, таких як Microsoft Excel або Google Sheets.

4. Електронне картографування полів. Для роботи з багатошаровими електронними картами використовуються геоінформаційні системи (GIS). У сучасних FMS інтерактивні карти дозволяють формувати та аналізувати різні типи інформаційних шарів [33]:

- карти вегетації;
- NDVI-карти;
- карти неоднорідності;
- карти врожайності;
- карти внесення добрив;
- карти витрат і прибутковості;
- карти вологості;
- карти обробітку полів;
- карти продуктивності.

5. Метеорологічні дані. При цьому джерелом інформації є автоматизовані метеостанції та цифрові погодні сервіси, які забезпечують моніторинг погодних умов і прогнозування змін кліматичних параметрів для планування робіт у полі.

Таким чином, сучасне аграрне виробництво пов'язане зі збором та обробкою значних обсягів внутрішньогосподарської інформації, яка безпосередньо впливає на якість управлінських рішень. Протягом виробничого циклу агровиробник приймає десятки стратегічних і сотні оперативних рішень, кожне з яких має вплив на подальший перебіг технологічних процесів та кінцевий результат виробництва. У цих умовах роль даних стає визначальною, оскільки ефективне управління агросистемами повинно базуватися на

достовірній, структурованій та інтегрованій інформації. Саме якість зібраних і оброблених даних визначає ефективність аналітики, точність прогнозування та результативність управлінських рішень у сучасному сільському господарстві.

2.2 Методи лінійного програмування в задачах оптимізаційного моделювання аграрного виробництва

На основі накопичення та систематизації даних здійснюється не лише оперативне й планове управління діяльністю аграрних підприємств. Вищим рівнем ефективного використання інформаційно-комунікаційних технологій є моделювання продуктивності агросистем та прогнозування таких важливих показників виробництва, як врожайності сільськогосподарських культур.

Складність аграрного виробництва, значна кількість факторів впливу та високий рівень невизначеності зумовлюють необхідність використання сучасних методів математичного моделювання й аналітики даних. У практичній діяльності аграрні підприємства часто стикаються з труднощами під час прийняття управлінських рішень щодо вибору культур для вирощування, визначення оптимальних строків проведення технологічних операцій, планування сезонної структури посівів та ефективного використання наявних ресурсів. Одним із ключових завдань є вибір найбільш ефективного варіанта серед кількох можливих альтернатив. За результатами опитування провідних фахівців аграрних підприємств, які використовують системи класу Farm Management System (FMS) понад 10 років, підтверджено, що математичне моделювання процесів вирощування культур у середовищі цифрових систем планування може охоплювати різні аспекти агровиробництва та забезпечувати формування оптимальних стратегій управління. Такі моделі дозволяють підвищити обґрунтованість управлінських рішень, оптимізувати використання ресурсів, прогнозувати результати виробництва та оцінювати ризики. Основні напрями ефективності застосування подібних моделей наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Напрямки моделювання показників в різних областях виробничої діяльності агропідприємств

Типи моделей за агрономічними показниками	Цільові показники моделювання та фактори впливу
Моделі фізіологічного розвитку рослин	– урахування фаз розвитку рослин: проростання, вегетації, цвітіння, плодоношення та досягання; – моделювання впливу кліматичних умов, вологості ґрунту, температури, освітлення та водних ресурсів на фізіологічні процеси розвитку культур
Моделі агротехнологічних процесів	– фактори впливу способів обробітку ґрунту, режимів поливу, систем удобрення та застосування засобів захисту рослин на продуктивність культур; – досягнення оптимальних строків і методів виконання агротехнічних операцій
Моделі метеоданих (погода, клімат)	– зв'язок метеорологічних даних та прогнозуванням факторів розвитку рослин; – моделювання впливу погодних умов на фенологічні процеси та формування врожайності
Моделі оптимізації вирощування	– урахування параметрів технології вирощування: вибору сортів, густоти посіву, схеми розміщення рослин та інших факторів; – застосування математичних методів для визначення оптимальних стратегій вирощування з урахуванням виробничих і ресурсних обмежень
Моделі прогнозування продуктивності культур	– використання методів статистичного аналізу та алгоритмів машинного навчання для прогнозування врожайності на основі історичних даних і поточних спостережень; – визначення факторів, що впливають на зміну врожайності між сезонами та окремими полями
Моделі просторового розподілу культур	– використання геоінформаційних систем (ГІС) для моделювання просторового розподілу культур з урахуванням характеристик ґрунту, рельєфу та ландшафту; – аналіз впливу географічних і природно-кліматичних факторів на ефективність вирощування
Моделі ресурсних потреб	– математичне моделювання витрат води, добрив, пального та енергетичних ресурсів під час вирощування культур; – визначення економічно доцільних стратегій управління ресурсами з урахуванням витрат і рівня продуктивності

Центральною проблемою сучасного землеробства є пошук і прийняття рішень щодо оптимального складу виробничих дій. Використання математичних моделей у середовищі цифрових систем планування дозволяє агрономам і керівникам агропідприємств більш точно прогнозувати результати виробництва, планувати технологічні операції та оптимізувати процеси вирощування культур з метою підвищення продуктивності агроценозів.

Серед кількісних методів аналізу особливе місце займає лінійне програмування (Linear Programming, LP), яке є одним із найбільш поширених інструментів підтримки прийняття рішень в умовах Агроіндустрії 4.0. Методи лінійного програмування дозволяють формалізувати складні виробничі задачі та знаходити оптимальні варіанти використання наявних ресурсів.

Модель лінійного програмування являє собою математичний метод пошуку максимального або мінімального значення лінійної цільової функції за наявності системи лінійних обмежень. Основною метою застосування LP-моделей у сільському господарстві є підвищення ефективності виробництва, оптимізація структури посівів, раціональний розподіл ресурсів та максимізація економічного результату діяльності підприємства.

У практичній діяльності аграрних підприємств фермери повинні ефективно управляти земельними, водними, енергетичними, трудовими та матеріальними ресурсами, зокрема насінням, добривами й засобами захисту рослин. Використання методів лінійного програмування дозволяє визначати найбільш доцільні варіанти використання цих ресурсів за різних виробничих умов.

Попередні дослідження, у яких застосовувалися LP-моделі, були спрямовані на розв'язання широкого спектра задач аграрного виробництва. Зокрема, за допомогою методів лінійного програмування здійснювали:

- максимізацію прибутку шляхом вибору найбільш ефективних культур для вирощування у відповідний сезон;
- оптимізацію розподілу земельних і водних ресурсів;
- визначення оптимальної структури посівних площ;
- підвищення прибутковості господарств з урахуванням обмежень щодо площі, інвестицій та виробничих ресурсів [41].

Водночас, максимізація обсягів виробництва не завжди забезпечує максимальний рівень прибутковості. Саме тому методи лінійного програмування широко використовуються для оптимізації планування виробництва з урахуванням реальних обмежень, що формуються на основі виробничого

досвіду, наявності ресурсів та економічної доцільності. На сучасному етапі моделі лінійного програмування (LP) активно використовуються в різних сферах діяльності:

- для оптимізації бюджету, управління активами та фінансового планування;
- для планування виробництва та оптимізації виробничих процесів;
- для оптимізації структури посівів, розподілу водних, земельних та матеріальних ресурсів.

До прикладних завдань лінійного програмування в аграрному секторі належать:

- оптимізація кормових раціонів;
- планування сівозміни культур;
- оптимальний розподіл природних ресурсів;
- оптимізація переробки продукції сільського господарства;
- визначення економічно доцільних технологій вирощування сільськогосподарських культур.

Таким чином, моделі LP є ефективним інструментом підтримки управлінських рішень у сільськогосподарському виробництві, оскільки дозволяють визначати оптимальні варіанти реалізації виробничих проектів в умовах обмеженості ресурсів та необхідності мінімізації витрат або максимізації прибутку.

Основними причинами широкого використання моделей лінійного програмування в аграрному секторі є:

1. Підвищення результативності, прибутковості фермерських господарств та забезпечення раціонального використання природних ресурсів [42].
2. Можливість оцінки економічного ефекту після впровадження моделей оптимізації [43].
3. Використання модифікованих моделей лінійного програмування, зокрема нечіткого цільового програмування, для прийняття рішень в умовах невизначеності [44].

Метод лінійного програмування належить до класичних інструментів операційних досліджень і використовується у випадках, коли цільова функція та система обмежень мають лінійний характер. Структура LP-моделі включає три основні компоненти: змінні рішення; цільову функцію; систему обмежень.

Змінні рішення характеризують параметри задачі, значення яких необхідно визначити для отримання оптимального результату. Цільова функція описує критерій оптимізації та може бути спрямована на максимізацію прибутку або мінімізацію витрат. У загальному вигляді цільова функція має вигляд:

$$f = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n, \quad (2.1)$$

де x_i – змінні рішення;

c_i – коефіцієнти цільової функції

Система обмежень визначає допустимі межі використання ресурсів та може задаватися у вигляді рівнянь або нерівностей. Додатково для всіх змінних вводяться умови невід’ємності [45]:

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

оскільки від’ємні значення фізичних величин є нереальними. Це означає, що допустимі розв’язки задачі знаходяться в першому квадранті координатної площини. На рис. 2.1 наведено графічну інтерпретацію задачі лінійного програмування для випадку двох змінних x_1 та x_2 . Такий підхід дозволяє наочно продемонструвати процес формування області допустимих розв’язків і визначення оптимального значення цільової функції.

Обмеження задачі подані у вигляді системи лінійних нерівностей, кожна з яких графічно задається прямою лінією. Перетин усіх допустимих областей формує так звану область допустимих розв’язків (Solution Space), заштриховану на рисунку. Будь-яка точка всередині цієї області задовольняє систему обмежень задачі. Вісі координат x_1 та x_2 відображають змінні рішення, для яких також виконуються умови невід’ємності: $x_1 \geq 0$, $x_2 \geq 0$. Це означає, що допустимі розв’язки розташовані лише в першому квадранті координатної площини.

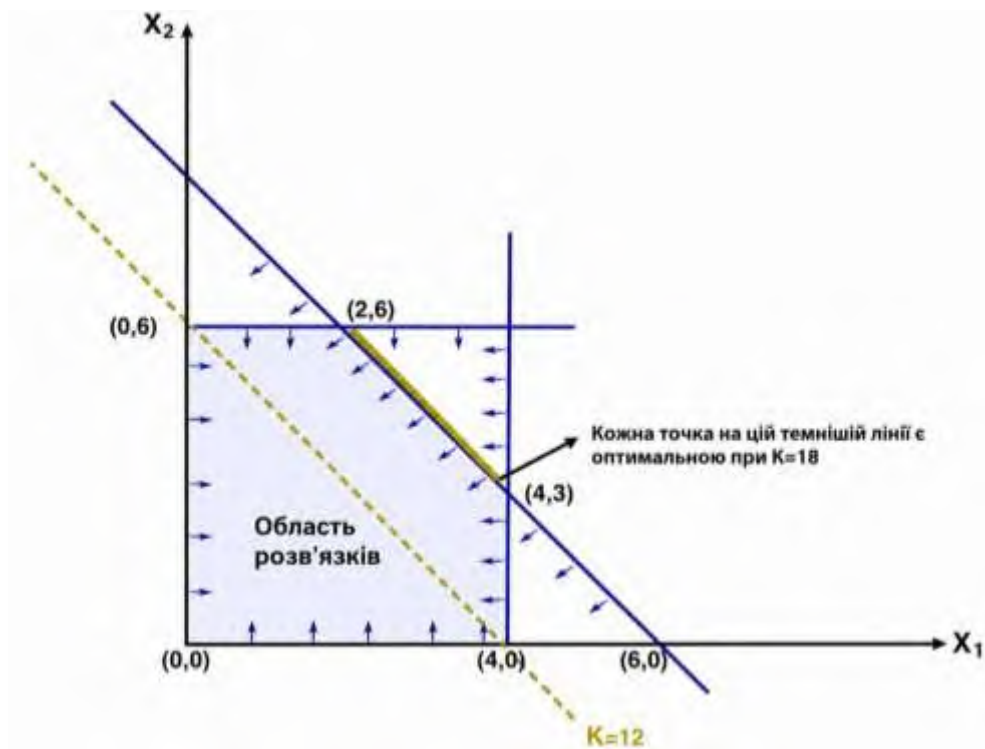


Рисунок 2.1 – Розрахунок оптимального розв'язку методом лінійного програмування

На рисунку також показано лінії рівня цільової функції. Пунктирна лінія відповідає одному зі значень функції $K=12$, тоді як темніша суцільна лінія демонструє оптимальний рівень $K=18$. Переміщення лінії цільової функції в напрямку стрілок відповідає збільшенню значення цільового показника.

Таким чином, графічний метод дозволяє:

- візуалізувати систему обмежень задачі;
- визначити область допустимих розв'язків;
- встановити напрям оптимізації цільової функції;
- знайти оптимальний або множину оптимальних розв'язків.

У задачах аграрного виробництва подібний підхід може застосовуватися для оптимізації структури посівів, розподілу земельних ресурсів, планування використання добрив, водних ресурсів та інших виробничих факторів за наявності ресурсних обмежень.

Досягнення допустимого розв'язку є однією з основних проблем задач LP, особливо коли система обмежень містить нерівності типу « $\geq$ » або рівності « $=$ ».

Такі задачі часто не мають очевидного початкового розв'язку, тому для їх ефективного розв'язання методи LP поєднують з іншими підходами багатокритеріальної оптимізації. Серед найбільш поширених підходів використовують:

- багатоцільове програмування;
- цільове програмування;
- мультиоб'єктне програмування;
- зважене цільове програмування.

Окреме значення для аграрного сектору має нечітке цільове програмування, яке дозволяє працювати з неповними, неточними або нечітко визначеними даними та обмеженнями. Це особливо актуально для сільського господарства, де значна частина параметрів залежить від погодних умов, природних факторів і ризиків, що складно формалізуються традиційними математичними методами.

Для практичного використання моделей лінійного програмування застосовуються спеціалізовані програмні засоби, які забезпечують побудову моделей, формування систем обмежень та автоматизований пошук оптимального розв'язку. Найбільш поширеними серед них є такі.

1. Microsoft Excel є одним із найбільш доступних і поширених інструментів кількісного аналізу. Надбудова Solver («Пошук рішення») дозволяє знаходити допустимі та оптимальні розв'язки задач лінійного програмування. Інструмент Solver часто використовується для проведення сценарного («what-if») аналізу та оцінювання впливу різних факторів на результат моделі [46].

У наукових дослідженнях Excel активно застосовується для побудови оптимізаційних моделей у сільському господарстві. Наприклад, у роботі [46] запропоновано модель управління невизначеністю сільськогосподарських доходів на основі нечіткого багатокритеріального лінійного програмування, реалізовану за допомогою Solver у середовищі Excel.

2. Спеціалізована мова математичного програмування AMPL (A Mathematical Programming Language) призначена для побудови та розв'язання

складних оптимізаційних моделей із великою кількістю змінних та обмежень [47]. AMPL широко використовується у задачах аграрної логістики, виробництва та управління ресурсами [48-49]. Для прикладу, в статтях [48-49] описано приклад застосування цього інструменту для оптимізації термінів і маршрутів доставки продукції рослинництва.

3. Для реалізації LP-моделей активно використовуються сучасні мови програмування та аналітичні середовища. Наприклад, у роботі [50] для створення програмного модуля оптимізації прибутку фермерського господарства використано Python та середовище розробки PyCharm. Такий підхід дозволяє створювати гнучкі аналітичні системи, інтегровані з базами даних, вебсервісами та FMS-платформами.

Таким чином, сучасні програмні засоби забезпечують ефективне формування математичних моделей, автоматизацію розрахунків та пошук оптимальних рішень у задачах лінійного програмування. Використання LP-моделей у поєднанні з інформаційними системами та засобами аналітики даних дозволяє суттєво підвищити якість управлінських рішень у сільському господарстві, оптимізувати використання ресурсів і забезпечити економічну ефективність агровиробництва. Загалом сфера застосування лінійного програмування в аграрному секторі є надзвичайно широкою. Основні напрями використання LP-моделей у сільському господарстві наведено на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Області застосування моделей LP в сільському господарстві

Розглянемо кілька прикладів застосування лінійного програмування для вирішення задач, пов'язаних із виробництвом продукції рослинництва.

2.3 Оптимізація виробничих процесів у рослинництві із застосуванням LP-моделей та систем Farm Management System

Першочерговими завданнями фермерських господарств у галузі рослинництва є планування структури посівів, дотримання науково обґрунтованих сівозмін та визначення оптимального розподілу земельних ресурсів з метою максимізації економічної ефективності виробництва. У цьому контексті методи лінійного програмування (LP) виступають ефективним цифровим інструментом підтримки прийняття рішень, який дозволяє формувати оптимальні виробничі плани з урахуванням ресурсних, економічних та технологічних обмежень.

У низці наукових досліджень підтверджено ефективність застосування LP-моделей для оптимізації структури агровиробництва. Так, у роботі [51] лінійне програмування було використано для визначення оптимального поєднання культур і напрямків господарювання у двох фермерських господарствах. У першому випадку аналізувалося співвідношення площ під горохом, пшеницею та тваринництвом, у другому – під гірчицею, нутом, пшеницею та свинарством. Отримані результати показали зростання прибутковості відповідно на 68 % та 16,5 %, що свідчить про значний потенціал LP-підходів для підвищення економічної результативності господарств. Дослідники також наголосили на позитивному впливі інтеграції тваринництва, оскільки використання органічних добрив сприяло зменшенню витрат і підвищенню родючості ґрунтів.

Одним із поширених напрямків застосування LP є оптимізація систем змішаних посівів (crop mix), коли фермер повинен визначити, які культури, у якій кількості та на яких площах доцільно вирощувати в межах одного виробничого сезону. У роботі [52] запропоновано модель, що забезпечує максимізацію

прибутку за умов обмеженості земельних ресурсів, бюджету та виробничих потужностей. Модель дозволила сформувати економічно обґрунтовану структуру посівів і підвищити ефективність використання ресурсів господарства.

Особливо важливим напрямком оптимізаційного моделювання є планування сівозмін. Сівозміна забезпечує підтримання родючості ґрунтів, зниження ризиків поширення шкідників та хвороб, а також стабілізацію урожайності. У дослідженні [53] LP-модель була застосована для формування оптимального плану ротації культур із урахуванням обмежень щодо земельних ресурсів, капіталу та виробничих витрат. У результаті чистий прибуток господарства зріс із 4 837 145 до 7 930 167 умовних одиниць, тобто майже у 1,64 раза, при одночасному зменшенні витрат ресурсів. Це підтверджує, що оптимізаційні методи дозволяють не лише збільшити прибуток, а й підвищити ефективність використання ресурсного потенціалу підприємства.

Для задач, у яких необхідно враховувати кілька критеріїв одночасно, традиційні LP-моделі часто комбінують із методами цільового програмування. Зокрема, поєднання LP та зваженого цільового програмування (WGP) дозволяє враховувати економічні, екологічні та технологічні фактори одночасно [53–54]. Такі моделі враховують стратегії висіву культур, потреби в додаткових ресурсах, вимоги до сівозміни та економії добрив. Практичні результати показали, що комбіновані підходи забезпечують вищий рівень доходу та ефективніше використання ресурсів порівняно з класичними схемами планування.

Окрему увагу приділяють задачам оптимального розподілу земельних ресурсів між культурами. У дослідженні [55] для розв'язання задачі розподілу площ під десять основних культур застосовано симплекс-метод та алгоритм Push-Pull. У результаті було визначено оптимальну структуру посівів, яка забезпечила максимальний прибуток за мінімальних витрат на насіння та інші ресурси. Дослідження також показало високу ефективність симплекс-алгоритму, який потребував меншої кількості ітерацій для досягнення оптимального розв'язку.

Практична реалізація методів оптимізації в сучасному агровиробництві безпосередньо пов'язана з використанням спеціалізованих інформаційних систем класу Farm Management System (FMS). Такі системи забезпечують централізоване управління потоками даних, автоматизацію виробничих процесів та підтримку прийняття рішень на основі аналітики. Аналіз функціоналу найбільш поширених в Україні платформ, зокрема «MASTER: Агрономія» від IT-Enterprise, «Cropwise Operations» та «Soft.Farm», показав, що їх модульна структура орієнтована на інтеграцію даних про стан посівів, агрооперації, погодні умови, агрохімічні показники та результати польових робіт.

Серед доступних рішень виділено систему Soft.Farm, яка базується на хмарних технологіях та забезпечує комплексне управління виробничими процесами у рослинництві. Система має модульну структуру, що дозволяє вести облік полів, формувати схеми сівозмін, планувати посіви, контролювати виконання польових операцій та здійснювати аналітичну обробку даних. Важливою перевагою є готові довідники ґрунтів, культур, техніки, засобів захисту рослин та інших компонентів агровиробництва, що створює основу для побудови єдиного інформаційного середовища підприємства. На початковому етапі впровадження Soft.Farm здійснюється заповнення базових довідників системи, зокрема «Відділення», «Поля» та «Схеми сівозміни» (рис. 2.3).

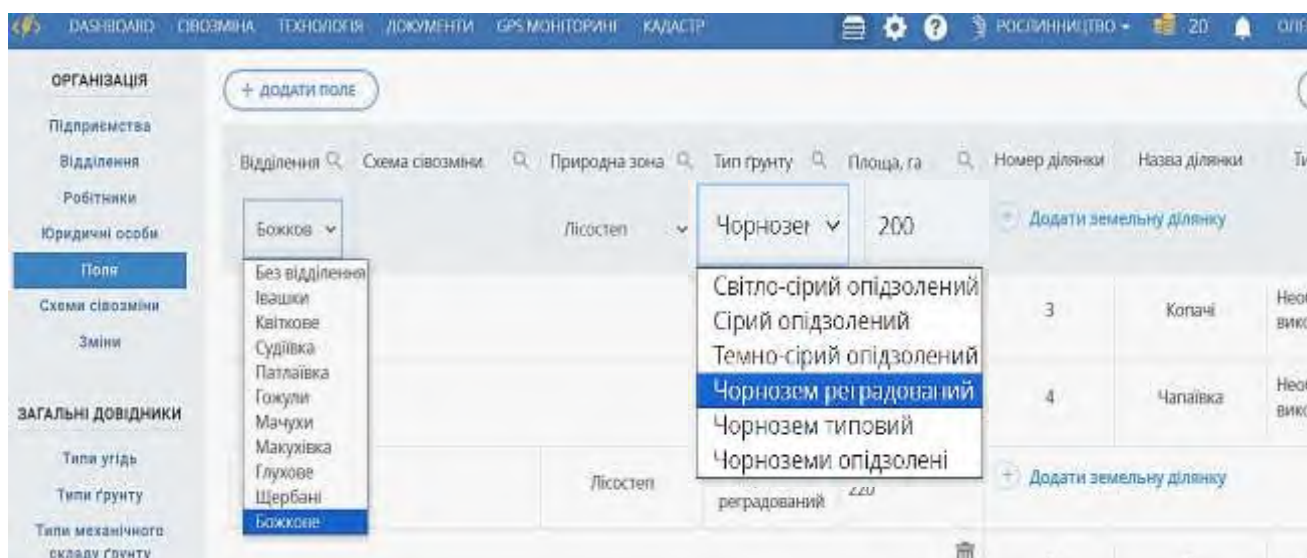


Рисунок 2.3 – Вигляд робочого вікна на етапі заповнення даних про всі поля господарства

Дані про поля пов'язуються з інформацією про природні зони, типи ґрунтів та інші характеристики, що дозволяє системі автоматично формувати релевантні параметри для подальших розрахунків. Після цього формується довідник сівозмін, де агроном задає послідовність культур, строки висіву та збирання врожаю. Система автоматично аналізує поєднання попередника й наступної культури та надає рекомендації щодо доцільності обраної схеми.

Функціональні можливості Soft.Farm дозволяють реалізувати елементи оптимізаційного моделювання безпосередньо в середовищі FMS. Наприклад, модуль «Посіви» забезпечує автоматизоване планування розміщення культур на полях із урахуванням площ, сортів, термінів висіву та прогнозованої урожайності. На основі цих даних система розраховує очікуваний валовий збір продукції та формує календарний план вирощування культур (рис. 2.4 -2.5).

Рисунок 2.4 – Порядок заповнення форми «Посів» IC Soft.Farm



Рисунок 2.5 – Візуалізація календарного плану висіву культур у господарстві

У системі Soft.Farm реалізовано механізми підтримки прийняття рішень щодо формування сівозміни. На основі попередньо введених даних про культури, типи ґрунтів та історію поля система автоматично аналізує сумісність попередників і наступників та формує рекомендації щодо доцільності вирощування культур. Система автоматично оцінює агротехнологічну сумісність культур у сівозміні та формує рекомендації щодо доцільності їх послідовного вирощування.

Особливе значення має модуль «Контроль висіву», який забезпечує оперативний моніторинг виконання посівних робіт. Система автоматично формує картограми посіву, визначає фактичну засіяну площу, витрати насіння та добрив, а також здійснює контроль траєкторії руху техніки (рис. 2.6).

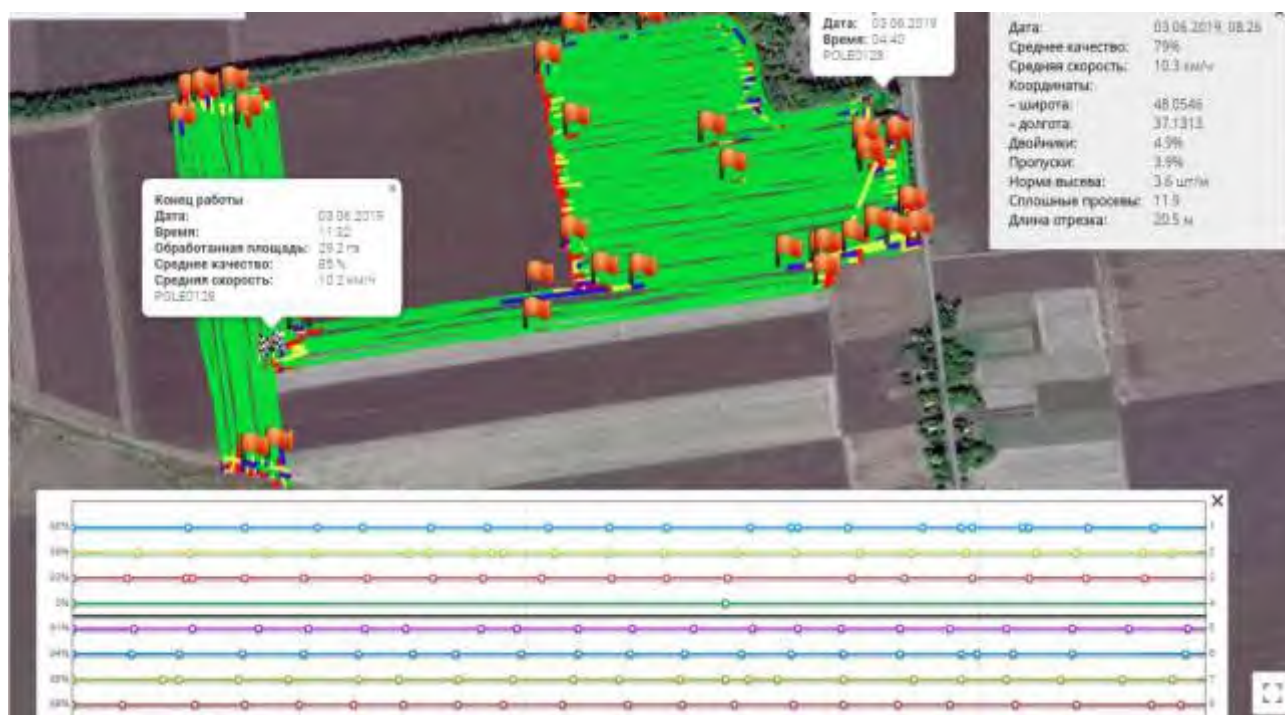


Рисунок 2.6 – Вигляд електронної картограми висіву «Контроль висіву»

Отримані дані можуть використовуватися для подальшого аналізу ефективності польових операцій та диференційованого внесення ресурсів.

Інструменти виробничого планування Soft.Farm дозволяють формувати прогнозні економічні показники вирощування культур. На основі введених даних про площі, урожайність і прогнозні ринкові ціни система автоматично розраховує очікуваний дохід від вирощування кожної культури, що фактично реалізує елементи оптимізаційного моделювання виробничого плану. Результати

можуть експортуватися до MS Excel для проведення додаткової аналітики, побудови LP-моделей або формування управлінської звітності.

Таким чином, сучасні FMS-платформи забезпечують не лише автоматизацію обліку й контролю агротехнологічних процесів, а й створюють основу для практичного застосування методів математичного моделювання та лінійного програмування. Поєднання централізованого збору даних, аналітичних модулів та алгоритмів оптимізації дозволяє підвищити ефективність управління агровиробництвом, забезпечити раціональне використання ресурсів і підтримати прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

РОЗДІЛ 3

ЗДІЙСНЕННЯ ЦИФРОВОГО АНАЛІЗУ, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДАНИХ ГАЛУЗІ РОСЛИННИЦТВА

3.1 Виклад результатів цифрової аналітики погодних даних та визначення впливу на коливання показників урожайності

Завершальною частиною проведених досліджень є висвітлення експериментальної перевірки ефективності інструментів електронних таблиць з усіма надбудовами та спеціалізованих ІС класу FMS для аналізу погодних умов, моніторингу стану сільськогосподарських культур та прогнозування врожайності, що співпадає з завданнями роботи. В сучасному рослинництві саме аналіз даних стає основою для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення продуктивності та зниження ризиків, покликаних впливом кліматичних факторів.

Метою практичних досліджень було продемонструвати можливості та ефективність застосування стандартного програмного забезпечення і спеціалізованих систем класу FMS для цифрової аналітики, моніторингу та оцінювання факторів, що впливають на урожайність сільськогосподарських культур. У підрозділі наведено результати аналізу даних, отриманих із відкритих джерел погодної інформації, як Visual Crossing Weather.

Для статистичного аналізу використане доступне ПЗ, зокрема Microsoft Excel та Google Таблиці. Обробка даних здійснювалася із застосуванням вбудованих статистичних функцій і засобів аналізу даних, серед яких COUNTIF, IF, CORREL, AVERAGE, LINEST та інші. Це дозволило виконати оцінювання взаємозв'язків між погодними показниками та урожайністю, визначити характер впливу окремих кліматичних факторів, а також сформулювати аналітичні висновки щодо їх ролі у виробничих процесах рослинництва.

У роботі також продемонстровано переваги здійснення агроскаутінгу в середовищі спеціалізованої інформаційної системи Soft.Farm. Зокрема, показано можливості інтеграції супутникових даних, карт вегетації, результатів польових

обстежень і технологічних операцій у межах єдиної цифрової платформи. Це дозволяє забезпечити централізоване накопичення, обробку та аналіз даних, необхідних для підтримки прийняття управлінських рішень у галузі рослинництва.

Не зважаючи на значний вибір спеціалізованих ІС точного землеробства (FMS), значна частина малих та середніх фермерських господарств не може повноцінно впровадити такі рішення. Це пов'язано з високою вартістю ліцензій, необхідністю спеціалізованого обладнання (зокрема, власних метеостанцій), регулярної оплати супутникових даних, а також браком кваліфікованого персоналу. За таких умов відкриті набори даних (open data), які включають метеорологічні спостереження, агростатистичні показники та інші відповідні параметри, є важливим альтернативним джерелом інформації. Аналіз цих даних можна ефективно проводити за допомогою стандартного офісного ПЗ, наприклад, електронних таблиць Microsoft Excel та Google Sheets. Використання цих інструментів забезпечує порівняно легкий підхід до цифрового аналізу, оскільки вони інтуїтивно зрозумілі та не вимагають спеціалізованих навичок програмування, а їх функціонал дозволяє реалізовувати як базові, так і більш складні статистичні методи обробки даних. У практиці сільськогосподарського аналізу електронні таблиці використовуються для вирішення наступних завдань:

- розрахунок основних статистичних характеристик, зокрема середнього значення за допомогою функції AVERAGE(), стандартного відхилення - STDEV() (або STDEV.P(), STDEV.S()), а також загальних значень та амплітуд показників;
- виявлення аномальних значень та відхилень на основі умовних структур IF() у поєднанні зі статистичними функціями;
- аналіз тенденцій часових рядів за допомогою функції TREND(), а також методів ковзної середньої;
- побудова регресійних моделей та оцінка залежностей між змінними за допомогою функції LINEST();

- прогнозування значень на основі лінійної регресії за допомогою функції `FORECAST.LINEAR()`;
- оцінка тісноти зв'язку між показниками за допомогою коефіцієнта кореляції, який реалізується функцією `CORREL()`.

Ці інструменти дозволяють використовувати класичні статистичні методи, такі як обчислення середнього, дисперсії, коефіцієнта варіації та ковзної середньої, не лише для аналізу історичних даних, але й для оцінки ризиків при прийнятті управлінських рішень. Наприклад, аналіз тривалості посушливих періодів у попередні роки дозволяє обґрунтувати доцільність страхування врожаю, коригувати структури посівів або вибору більш стійких сортів сільськогосподарських культур.

Кліматичні фактори (температура, опади, вітри) безпосередньо впливають на ріст і розвиток рослин, поширення хвороб, терміни проведення сільськогосподарських робіт, режими зрошення та кінцеву врожайність. Відповідно, систематичний моніторинг таких показників, як температура повітря, опади, вологість ґрунту та рівень сонячної радіації, є необхідною передумовою для формування адаптивної стратегії управління сільськогосподарським виробництвом [57].

Для ілюстрації практичного застосування описаного підходу було розглянуто задачу про аналіз впливу середніх погодних показників на фактичну врожайність кукурудзи в Полтавській області.

Розрахунки виконувалися виключно на основі відкритих даних: щоденні метеорологічні спостереження отримувалися з платформи *Visual Crossing Weather* (у форматі CSV) [58], а статистичні дані щодо врожайності кукурудзи в Полтавській області за 2017–2024 рр. – з аналітичного сайту *SuperAgronom* [59]. Приклад проведення аналізу погодних аномалій даних в на аркуші електронної таблиці середовищі *Microsoft Excel* показано на рис. 3.1. Таким чином, навіть за відсутності доступу до платних джерел інформації можна провести обґрунтований аналіз та сформулювати практично значущі висновки на основі доступних інструментів.

E2	=IF(AND(MONTH(A2)=3,B2<5),"Cold",IF(AND(MONTH(A2)=3,B2>15),"Heat",""))					
	A	B	C	D	E	F
1	datetime	temp	precip	windspeed	Spring_anomaly	Heavy_rain
2	2017-01-01	-2.9	0.2	11.2		0
3	2017-01-02	0.1	0.1	18		0
70	2017-03-10	7	0	19.4		0
71	2017-03-11	6	0	25.2		0
72	2017-03-12	3.6	0	22.3	Cold	0
73	2017-03-13	4.3	0	21.6	Cold	0

Рисунок 3.1 – Статистичний аналіз аномальних погодних явищ за даними щоденних спостережень середньодобових температур

Для ідентифікації погодних аномалій у весняний період було застосовано підхід умовної класифікації на основі функцій IF(), AND() та MONTH().

Дні березня із середньодобовою температурою нижче 5°C було віднесено до категорії «Cold», тоді як значення понад 15°C – до категорії «Heat». Аналіз даних за 2017 р. показав, що весняний період характеризується вираженою нестабільністю температур та наявністю кількох хвиль похолодання, які мають кластерний характер (кілька послідовних днів із відхиленнями). Узагальнення результатів для кількох років свідчать про високу варіативність погодних умов навесні та тенденцію до повторюваних холодних стресів, що створює додаткові ризики для початкових фаз розвитку сільськогосподарських культур.

Розрахунок середньорічної температури повітря (B2:B9) на основі щоденних спостережень, а також визначення середньорічної кількості опадів (C2:C9) показано на рис. 3.2 і рис. 3.3 відповідно.

B2	=AVERAGE(FILTER(Raw!\$B:\$B, YEAR(Raw!\$A:\$A)=A2))				
	A	B	C	D	E
1	Year	AvgTemp_C	TotalPrecip_mm	AvgWind_mps	Corn_Yield_t_ha
2	2017	9.904931507	480.2	19.85506849	5.04
3	2018	9.535890411	641.5	17.94657534	8.22
4	2019	10.59068493	458.2	17.81205479	6.98
5	2020	10.75245902	498.6	18.3079235	5.48
6	2021	9.269589041	675.4	17.84958904	6.79
7	2022	9.774794521	779.6	19.19863014	7.24
8	2023	10.47780822	746	18.99369863	7.79
9	2024	11.5931694	372.3	18.48087432	5.8

Рисунок 3.2 – Створення масиву середньорічних температур

C2 fx =SUM(FILTER(Raw!\$C:\$C, YEAR(Raw!\$A:\$A)=A2))

	A	B	C	D	E
1	Year	AvgTemp_C	TotalPrecip_mm	AvgWind_mps	Corn_Yield_t_ha
2	2017	9.904931507	480.2	19.85506849	5.04
3	2018	9.535890411	641.5	17.94657534	8.22
4	2019	10.59068493	458.2	17.81205479	6.98
5	2020	10.75245902	498.6	18.3079235	5.48
6	2021	9.269589041	675.4	17.84958904	6.79
7	2022	9.774794521	779.6	19.19863014	7.24
8	2023	10.47780822	746	18.99369863	7.79
9	2024	11.5931694	372.3	18.48087432	5.8

Рисунок 3.3 – Створення масиву даних по середньорічній кількості опадів

Подальшим етапом дослідження є оцінка взаємозв'язку між середньорічною температурою повітря (стовпчик B), середньорічної кількості опадів (стовпчик C) та врожайністю кукурудзи із використанням кореляційного аналізу в Microsoft Excel (стовпчик E). Для цього застосовано функцію CORREL(), яка дозволяє визначити коефіцієнт лінійної кореляції (рис. 3.4) між двома вибірками даних (обведено рамками).

G3 fx =CORREL(\$C\$2:\$C\$9,\$E\$2:\$E\$9)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Year	AvgTemp_C	TotalPrecip_mm	AvgWind_mps	Corn_Yield_t_ha				
2	2017	9.904931507	480.2	19.85506849	5.04		-0.3896040326		
3	2018	9.535890411	641.5	17.94657534	8.22		0.688308761		
4	2019	10.59068493	458.2	17.81205479	6.98				
5	2020	10.75245902	498.6	18.3079235	5.48		0.1684658156	0.005792377948	1.574722417
6	2021	9.269589041	675.4	17.84958904	6.79		0.6367157066	0.003252236728	7.901339201
7	2022	9.774794521	779.6	19.19863014	7.24		0.4810350357	0.9623183731	#N/A
8	2023	10.47780822	746	18.99369863	7.79		2.31728088	5	#N/A
9	2024	11.5931694	372.3	18.48087432	5.8		4.291866744	4.630283256	#N/A

Рисунок 3.4 – Встановлення коефіцієнтів кореляції між температурами та урожайністю кукурудзи, опадів за рік та урожайності

Отримані результати свідчать про варіативний характер зв'язку між досліджуваними показниками в різні роки. Зокрема, у 2017 р. спостерігається помірний від'ємний зв'язок ($r \approx -0,39$), що може вказувати на негативний вплив підвищених температур на врожайність за умов недостатнього зволоження. Водночас у 2021 р. фіксується помірний додатний зв'язок ($r \approx 0,64$), що свідчить

про сприятливу роль температурного режиму за наявності достатнього водозабезпечення. Така неоднорідність результатів підтверджує складний, багатфакторний характер формування врожайності, де температура виступає лише одним із впливових, але не визначальним чинником.

У наступному експерименті логічним кроком є застосування методів регресійного аналізу, які дозволяють кількісно описати залежність між змінними та здійснювати прогнозування. У табличному процесорі Microsoft Excel для цього доцільно використовувати функцію LINEST(), яка забезпечує оцінку параметрів лінійної регресійної моделі, а також функцію FORECAST.LINEAR(), що дозволяє обчислювати прогнозні значення врожайності на основі встановленої залежності. Поєднання кореляційного та регресійного аналізу створює методологічну основу для побудови спрощених, але інформативних моделей прогнозування, придатних для використання при обмежених даних.

Функція LINEST() дозволяє оцінити параметри регресійного рівняння: коефіцієнти при кожній змінній, вільний член, статистичні характеристики моделі, включаючи коефіцієнт детермінації (R^2) та стандартні похибки.

Отримані результати свідчать про неоднорідний вплив факторів на врожайність у різні роки. Зокрема, коефіцієнти регресії для температури змінюють знак і величину, що узгоджується з попереднім кореляційним аналізом і підтверджує нестабільність її впливу. Значення коефіцієнта детермінації (R^2) варіюється, що вказує на різний ступінь пояснювальної здатності моделі: в окремих випадках модель добре апроксимує емпіричні дані, тоді як в інших – значна частка варіації врожайності залишається не поясненою. Це свідчить про наявність впливу додаткових факторів (агротехнічних, ґрунтових, біологічних), які не були включені до моделі.

Для оцінювання впливу кліматичних факторів на урожайність кукурудзи було застосовано метод множинної лінійної регресії. Такий підхід дозволяє формалізувати залежність між результативною ознакою – урожайністю культури – та кількома незалежними змінними, що характеризують погодні умови впродовж вегетаційного періоду (рис. 3.5).

G5 =LINEST(\$E\$2:\$E\$9,{ \$C\$2:\$C\$9, \$B\$2:\$B\$9 },TRUE,TRUE)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Year	AvgTemp_C	TotalPrecip_mm	AvgWind_mps	Corn_Yield_t_ha				
2	2017	9.904931507	480.2	19.85506849	5.04		-0.3896040326		
3	2018	9.535890411	641.5	17.94657534	8.22		0.688308761		
4	2019	10.59068493	458.2	17.81205479	6.98				
5	2020	10.75245902	498.6	18.3079235	5.48		0.1684658156	0.005792377948	1.574722417
6	2021	9.269589041	675.4	17.84958904	6.79		0.6367157066	0.003252236728	7.901339201
7	2022	9.774794521	779.6	19.19863014	7.24		0.4810350357	0.9623183731	#N/A
8	2023	10.47780822	746	18.99369863	7.79		2.31728088	5	#N/A
9	2024	11.5931694	372.3	18.48087432	5.8		4.291866744	4.630283256	#N/A

Рисунок 3.5 – Побудова моделі множинної лінійної регресії на основі LINEST()

У проведеному дослідженні як залежну змінну було обрано показник урожайності кукурудзи Y ($Corn_Yield_t_ha$), в одиницях т/га, а як факторні ознаки використано:

- середню температуру повітря за сезон (X_1 , $AvgTemp_C$), в °C;
- сумарну кількість опадів (X_2 , $TotalPrecip_mm$), в мм;
- середню швидкість вітру (X_3 , $AvgWind_mps$), в м/с.

Формалізована модель множинної лінійної регресії має вигляд:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \varepsilon, \quad (3.1)$$

де Y – прогнозована урожайність кукурудзи;

a – вільний член моделі;

b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти регресії;

X_1, X_2, X_3 – факторні ознаки;

ε – випадкова похибка моделі.

Для побудови моделі використовувались статистичні дані за 2017–2024 рр., які були попередньо структуровані у вигляді таблиці. Кожен рядок таблиці відповідає окремому року спостережень і містить значення урожайності та погодних показників. Формалізація даних передбачала:

- занатаження погодних даних із сервісу Visual Crossing Weather;
- опрацювання метеорологічних показників за вегетаційний період;
- приведення одиниць вимірювання до єдиного формату;

- розміщення даних в табличній формі для подальшого аналізу;
- перевірку коректності та повноти даних.

Для розрахунку параметрів моделі в середовищі Google Таблиць було використано функцію LINEST() в такому записі:

$$= \text{LINEST}(\$E\$2:\$E\$9, \{ \$C\$2:\$C\$9, \$B\$2:\$B\$9 \}, \text{TRUE}, \text{TRUE}), \quad (3.2)$$

де $\$E\$2:\$E\9 – діапазон значень урожайності кукурудзи;

$\$B\$2:\$B\9 – значення середньої температури;

$\$C\$2:\$C\9 – значення сумарних опадів;

TRUE – розрахунок вільного члена рівняння; другий TRUE – виведення додаткової статистики регресійної моделі.

У результаті обробки статистичних даних засобами множинної лінійної регресії було отримано формалізовану модель залежності урожайності кукурудзи від кліматичних факторів на основі рівняння 3.1:

$$Yield = 1,57 + 0,0058 Precip + 0,17 Temp.$$

Коефіцієнт детермінації моделі становить: $R^2=0,48$.

Отримана модель показує, що між урожайністю кукурудзи та досліджуваними кліматичними факторами існує помірний статистичний зв'язок.

Значення $R^2=0,48$ свідчить про те, що приблизно 48 % варіації урожайності пояснюється змінами температури повітря та кількості опадів. Інша частина варіації пов'язана з впливом додаткових факторів, які не були включені до моделі, зокрема агротехнологічних особливостей, типу ґрунтів, рівня удобрення, гібридів культур, впливу шкідників, якості виконання польових операцій тощо.

Аналіз коефіцієнтів регресії дозволяє оцінити характер впливу окремих факторів:

- коефіцієнт 0,0058 при змінній *Precip* (сумарна кількість опадів за вегетаційний період, мм) означає, що збільшення кількості опадів на 1 мм за інших незмінних умов приводить до середнього зростання урожайності приблизно на 0,0058 т/га;

– коефіцієнт 0,17 при змінній *Temp* (середня температура повітря за період вегетації, °C) свідчить, що підвищення середньої температури на 1 °C асоціюється зі збільшенням урожайності приблизно на 0,17 т/га.

Вільний член моделі 1,57 відображає умовне базове значення урожайності за нульових значень факторних ознак. У практичному контексті цей параметр виконує математичну функцію балансування рівняння регресії та окремо не інтерпретується як реальна урожайність.

Позитивні значення коефіцієнтів регресії свідчать про прямий характер впливу температури та опадів на урожайність кукурудзи в межах досліджуваної вибірки. Це узгоджується з агробіологічними особливостями культури, оскільки достатнє зволоження та сприятливий температурний режим є важливими умовами формування високої продуктивності посівів.

Отримана модель може використовуватись:

- для попереднього прогнозування урожайності;
- оцінювання впливу кліматичних умов на продуктивність;
- порівняння різних сезонів вирощування;
- підтримки прийняття рішень у системах точного землеробства та FMS;
- подальшого розвитку моделей прогнозування із включенням додаткових факторів.

3.2 Створення електронних карт для агрозон спеціального впливу на основі агроскаутингу

Багаторічний аналіз погодно-кліматичних умов свідчить про зростання рівня ризиків у галузі рослинництва: спостерігаються аномальні температурні режими, нерівномірний розподіл опадів, тривалі посушливі періоди та значна міжрічна мінливість урожайності. За таких умов аграрні підприємства змушені постійно адаптувати технології вирощування культур, впроваджувати цифрові інструменти моніторингу та вдосконалювати систему управління виробничими

процесами з метою забезпечення стабільної врожайності та підтримання рентабельності виробництва.

Особливу увагу приділено агроскаутінгу як одному з ключових елементів цифрового моніторингу в системах точного землеробства. Агроскаутінг являє собою комплексний підхід до спостереження за станом посівів, який поєднує польові обстеження, супутниковий моніторинг, геопросторовий аналіз та засоби мобільного збору даних. Використання сучасних інформаційних технологій дозволяє оперативно виявляти проблемні ділянки посівів, оцінювати ризики розвитку хвороб, дефіциту вологи чи елементів живлення, а також підвищувати ефективність управління польовими роботами.

Агроскаутинг можна визначити як систематичний процес збору, фіксації та аналізу інформації про стан посівів і ґрунту з метою підтримки оперативного прийняття рішень. Основними завданнями агроскаутингу є:

- своєчасне виявлення стресових факторів (посухи, дефіциту живлення, бур'янів, шкідників і хвороб);
- локалізація проблемних зон для проведення диференційованої або точкової обробки;
- оцінювання динаміки розвитку культур;
- прогнозування урожайності на основі польових і дистанційних даних;
- зменшення витрат ресурсів шляхом переходу від суцільних до адресних (локальних) технологічних операцій.

Сучасні цифрові платформи точного землеробства забезпечують повний набір інструментів для ведення агроскаутингу. До них належать безпілотні літальні апарати, системи супутникового моніторингу, технології комп'ютерного зору та мобільні застосунки для збору польових даних. Зокрема, методи комп'ютерного зору дозволяють автоматизовано розпізнавати типи пошкоджень рослин за фотографіями, класифікувати хвороби та визначати ознаки стресу. Використання дронів дає змогу здійснювати регулярний моніторинг полів, виявляти нові проблемні ділянки на NDVI-картах (Normalized Difference Vegetation Index) і локалізувати зони, що потребують обробки.

Таким чином, агроскаутинг виступає проміжною ланкою між дистанційним моніторингом та оперативним управлінським втручанням. Без використання цифрових технологій польові обстеження потребують значних часових і трудових витрат та не забезпечують достатнього рівня оперативності. Натомість інтеграція супутникових даних, GPS-навігації, мобільних застосунків і геоінформаційних систем значно підвищує ефективність контролю за станом посівів.

Практичну реалізацію методів агроскаутингу та формування геозон проблемних ділянок доцільно розглянути на прикладі цифрової платформи Soft.Farm, яка містить необхідний набір модулів точного землеробства, зокрема безкоштовний модуль «Агроскаутинг» Soft.Farm. Платформа дозволяє користувачам створювати власні електронні мапи полів, накопичувати історію стану посівів та виконувати цифровий моніторинг виробничих процесів [33].

Процес агроскаутингу включає кілька основних етапів: збір даних, їх аналіз, візуалізацію результатів і формування рекомендацій щодо подальших дій. Збір інформації може здійснюватися двома основними способами:

- безпосереднім польовим обстеженням, під час якого агрономи або скаути фіксують ознаки пошкодження культур, стан рослин, бур'яни чи шкідників;
- дистанційним моніторингом із використанням дронів, оснащених камерами та сенсорами для зйомки полів із висоти.

У результаті аналізу отриманих даних визначаються:

- загальний стан посівів;
- рівень ризиків для врожаю;
- необхідність проведення технологічних операцій;
- рекомендації щодо внесення добрив, застосування засобів захисту рослин або проведення локальної обробки.

У середовищі Soft.Farm усі джерела даних інтегруються в єдину аналітичну базу: польові спостереження, супутникові знімки, результати дронного моніторингу, погодні та ґрунтові показники. Платформа підтримує

створення маршрутів агроскаутингу з GPS-прив'язкою та дозволяє організовувати регулярні обстеження полів за фазами розвитку культур відповідно до шкали BBCH. На основі NDVI-карт система допомагає визначати локальні осередки хвороб, шкідників або бур'янів та оперативно формувати завдання для польових працівників.

Під час польового огляду скаут фіксує такі характеристики:

- типи та ступінь поширення бур'янів;
- густоту та стан розвитку рослин;
- ознаки пошкодження посівів;
- види шкідників і масштаби ураження культур.

Зібрана інформація вноситься через мобільний застосунок із автоматичною GPS-прив'язкою до координат поля [60]. Система підтримує завантаження фотографій, текстових коментарів та формування електронних звітів. Усі дані відображаються на електронній карті поля та зберігаються в базі даних платформи (рис. 3.6).

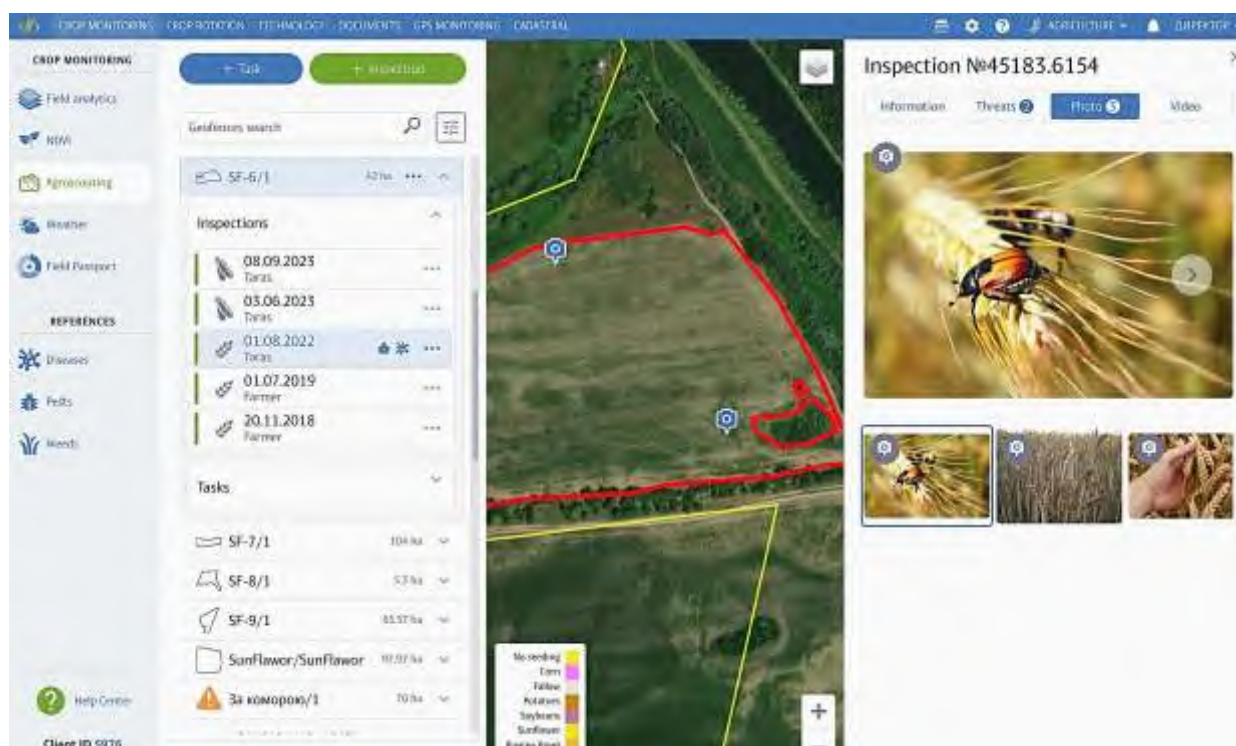


Рисунок 3.6 – Комплексна форма внесення даних інспекцій скаутів, формування бази знімків та нанесення локацій на мапу в IC Soft.Farm

На панелі перегляду «Inspection» фахівець отримує доступ до результатів проведених обстежень: дати виконання, виконавця, культури, опису проблеми та доданих зображень. Кожен знімок містить координати геолокації, статус обстеження та короткий опис зафіксованого стану культури (рис. 3.7).

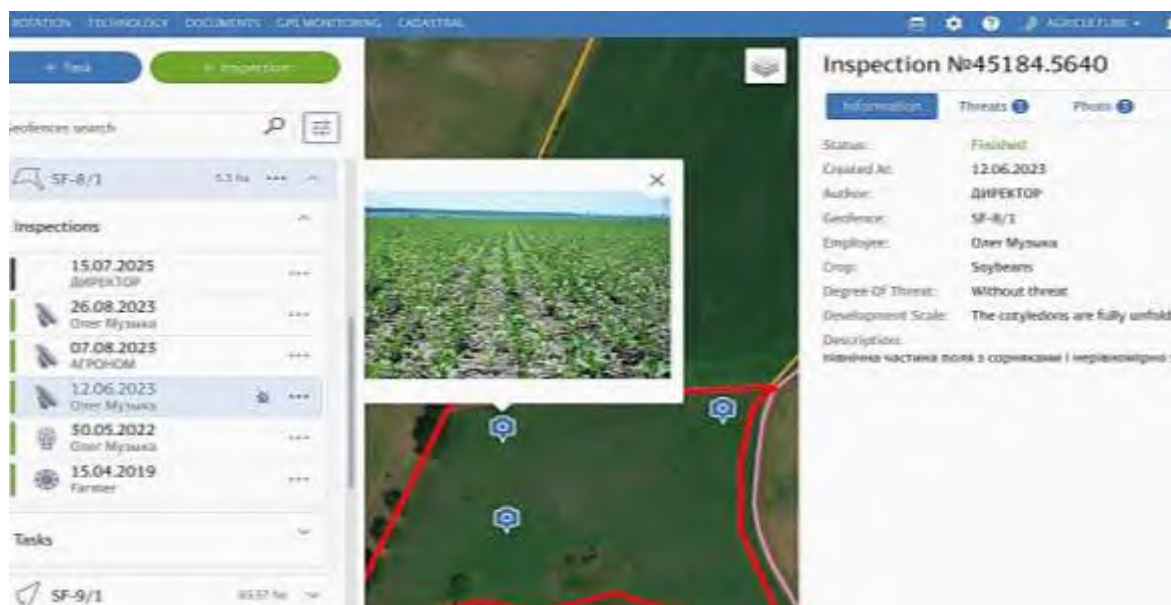


Рисунок 3.7 – Огляд стану посівів за результатами агроскаутингу згідно даних і зображень, внесених в базу IC Soft.Farm

Крім того, у систему інтегровані довідники шкідників, хвороб рослин, добрив і технічних засобів, що дозволяє автоматизувати процес формування рекомендацій та створення завдань для локальної обробки полів.

Важливу роль у сучасному агроскаутингу відіграють агродрони. Використання безпілотних літальних апаратів із мультиспектральними або гіперспектральними камерами дозволяє швидко обстежувати значні площі посівів та отримувати високодеталізовані зображення. Планування польотів здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, EOSDA Crop Monitoring, де задаються параметри маршруту та висоти зйомки [61]. Отримані дані можуть аналізуватися як у реальному часі, так і після завершення польоту. Для оцінювання поточного стану посівів широко застосовуються NDVI-карти, які формуються на основі мультиспектральних знімків. Індекс NDVI дозволяє оцінити інтенсивність фотосинтезу та рівень

розвитку рослинності, що є важливим показником здоров'я посівів. Інтеграція NDVI-карт, GPS-координат, контурів полів та карт продуктивності створює цілісну просторову модель для проведення цифрової аналітики.

Отже, агроскаутинг поєднує польову експертизу та сучасні smart-технології, забезпечуючи оперативне отримання достовірних даних про стан посівів. Це дозволяє своєчасно реагувати на проблеми, підвищувати ефективність використання ресурсів і забезпечувати стабільність урожайності в умовах зростання кліматичних ризиків. Додаткове впровадження інструментів штучного інтелекту значно прискорює процес розпізнавання та класифікації зображень, що дає змогу автоматизувати аналіз великої кількості даних і підвищити оперативність прийняття управлінських рішень.

3.3 Економічне обґрунтування впровадження систем цифрового управління аграрним виробництвом на прикладі Soft.Farm

Ефективність впровадження інформаційних систем управління аграрним виробництвом визначається не лише рівнем автоматизації виробничих процесів, а й здатністю системи забезпечувати підвищення економічних показників діяльності підприємства [62]. Методологія оцінювання ефективності впровадження FMS базується на порівнянні економічних, технологічних та організаційних показників діяльності підприємства до та після використання цифрової системи. Основною метою такого аналізу є визначення ступеня впливу автоматизації на продуктивність виробництва, витрати ресурсів, урожайність, оперативність прийняття рішень і загальний рівень рентабельності господарства. Комплексна оцінка ефективності впровадження FMS передбачає використання кількох груп показників: економічних; виробничо-технологічних; організаційних; аналітичних.

До економічних показників належать:

- зміна рівня прибутку;

- рентабельність виробництва;
- скорочення витрат на насіння, добрива, паливо та засоби захисту рослин;
- зниження непродуктивних витрат;
- термін окупності програмного забезпечення;
- економічний ефект від оптимізації використання ресурсів.

У загальному вигляді економічний ефект від впровадження FMS можна визначити як різницю між отриманими результатами та витратами на впровадження системи:

$$E=R-C, \quad (3.3)$$

де E – економічний ефект;

R – сукупний результат від використання системи;

C – витрати на впровадження та експлуатацію FMS.

Сукупний результат від впровадження FMS може включати:

- приріст урожайності;
- зменшення витрат матеріальних ресурсів;
- скорочення витрат пального;
- економію трудових ресурсів;
- зменшення втрат продукції;
- зростання прибутку від підвищення точності управлінських рішень.

Результати підрахунків економії ресурсів за різними методиками [36] підтверджують, що впровадження цифрових технологій у системах точного землеробства дозволяє суттєво скоротити витрати пального, посівного матеріалу, добрив, гербіцидів і засобів захисту рослин. Основними чинниками економії є GPS-контроль техніки, паралельне водіння, усунення перекриттів під час виконання технологічних операцій, а також автоматизований контроль внесення ресурсів.

На основі опублікованих компанією ТОВ «Кварт Софт» даних як офіційного розробника та дистриб'ютора IC Soft.Farm, використання окремих модулів системи (в першу чергу «Земельний банк» та «Агротехнологія»),

забезпечує відчутний економічний ефект уже протягом першого виробничого циклу. У табл. 3.1 представлені оціночні розрахунки для умовних 1000 га полів, проведені за усередненими показниками господарств регіону, які стосувалися економії певних категорій ресурсів після впровадження FMS.

Таблиця 3.1 – Оціночні показники збільшення прибутковості традиційних робіт із залученням інструментів IC Soft.Farm (за цінами на кінець 2025 р.)

Вид ресурсу	Відсоток зменшення витрат на 1000 га	Заощаджений ресурс, одиниць /1000 га	Середня вартість (прибутковість) за т (га), грн	Економія в грошовому вимірі, грн
Уточнення обліку земельних площ ділянок, га	3 %	30	11200	336000
Внесення добрив, т	15 %	30	26100	783000
Витрати палива на польові роботи з GPS-контролем, л	10 %	800	76,76	61408
Сумарний показник	-	-	-	1180408

При проведенні обчислень були взяті довідкові ціни дизельне пальне за останній квартал 2025 р., вартість 1 т комплексного (азотно-фосфорно-калійного) мінерального добрива Нітроамофоска-М: NPK 9:18:22, які відповідно складають: 76,76 грн/л дизельного пального [63], 26100 грн/т комплексного добрива [64]. Наведені значення мають аналітичний характер і використовуються виключно для оцінювання економічної ефективності.

Результати розрахунків показали, що лише завдяки застосуванню окремих модулів системи Soft.Farm економія ресурсів може перевищувати 1,18 млн грн на кожні 1000 га посівних площ. Найбільший економічний ефект забезпечується за рахунок:

- точного обліку земельних угідь;
- контролю норм внесення добрив;
- зменшення перевитрат пального;
- скорочення перекриттів при виконанні польових робіт;
- оптимізації технологічних операцій.

Наступним етапом оцінювання ефективності впровадження інформаційних технологій є визначення сукупних витрат [65] на реалізацію проєкту та оцінювання обсягу інвестицій, необхідних для досягнення поставленої мети.

Оцінка витрат на впровадження ІС складається з двох основних етапів:

- визначення капітальних і поточних витрат, пов'язаних із впровадженням та експлуатацією системи;
- оцінювання обґрунтованості інвестицій та можливих ризиків реалізації проєкту.

Загальна величина витрат на впровадження ІТ-проєкту може бути визначена за формулою:

$$C = C_d + C_i + C_s + C_l, \quad (3.4)$$

де C – сумарні витрати на впровадження інформаційної системи;

C_d – прямі витрати при імплементації ІС у виробничій діяльності;

C_i – непрямі витрати на впровадження;

C_s – витрати на супровід системи протягом життєвого циклу;

C_l – ймовірні втрати від простоїв або неполадок.

Реєстрація і внесення даних є в системі безкоштовними. Склад і вартість платних пакетів ІС Soft.Farm залежать від набору модулів («На вибір» або «Безліміт») і залежать від індивідуальних потреб підприємства (додаток А).

Загальна величина витрат на впровадження ІТ-проєкту може бути визначена за формулою:

Однією з переваг використання ІС Soft.Farm є надання безкоштовного пакету при реєстрації та використанні окремих модулів і довідкових ресурсів. Вартість комерційних пакетів залежить від кількості обраних модулів та індивідуальних потреб підприємства (додаток А).

Попередні розрахунки витрат, виконані на основі усереднених показників за 2025 рік та досвіду впровадження аналогічних проєктів компанією «Кварт-Софт», наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні статті прогнозних витрат на реалізацію проєкту з впровадження корпоративної IC Soft.Farm

№п/п	Перелік пунктів прямих витрат	Вартість, грн
1	Купівля повного пакету IC «Безліміт»	15500
2	Купівля необхідного устаткування для роботи IC	12400
3	Розробка техзавдання (ТЗ)	18000
4	Перенесення даних з різних джерел до бази даних IC, робота аналітиків компанії (3600 грн добова оплата*10 днів)	36000
5	Технічний супровід IC та комунікаційного обладнання за рік (поза сервісом Soft.Farm)	16400
6	Первинне навчання персоналу (управлінців, виконавців), 8 осіб (інтенсив, 2 наставника, 4дні*6 години, добові за відрядження)	11600
7	Разом сума прямих витрат (сума позицій 1-6)	72100
8	Витрати на оплату праці нового штатного працівника з IT на рік	153600
9	Всього витрати (поз.7+8)	225700

Аналіз структури витрат показав, що найбільшу частку становлять затрати на формування єдиної бази даних підприємства, технічний супровід та оплату праці IT-фахівця. Загальна сума витрат на впровадження корпоративної IC Soft.Farm за оцінками склала близько 225,7 тис. грн. Порівняння розрахунку очікуваного економічного ефекту та витрат на впровадження системи показує, що використання багатомодульної FMS є економічно доцільним навіть для підприємств середнього масштабу.

За результатами проведених розрахунків зниження сукупних матеріальних витрат на 5–15 % дозволяє заощадити до 1180,4 тис. грн за один виробничий сезон на кожні 1000 га. Це забезпечує покриття основних витрат на придбання, налаштування та впровадження системи вже протягом першого року експлуатації.

Отже, впровадження сучасних FMS-систем, зокрема Soft.Farm, забезпечує не лише автоматизацію виробничих і управлінських процесів, а й створює реальний економічний ефект за рахунок оптимізації ресурсів, підвищення точності управління та зменшення непродуктивних витрат. У перспективі це формує основу для подальшої цифрової трансформації аграрного виробництва відповідно до концепції Агрокультури 4.0.

ВИСНОВКИ

Під час виконання завдань кваліфікаційної роботи були проведені теоретичні інтегративні дослідження основних тенденцій використання цифрових інструментів в аграрному секторі, проаналізовані приклади досягнень в цій сфері та здійснені власні розрахунки на основі експериментальних та загальнодоступних даних. За результатами сформовані висновки.

1. Підтверджено, що впровадження інформаційних систем управління виробничими процесами є одним із ключових чинників підвищення ефективності сучасного аграрного виробництва. Аналіз функціональних можливостей спеціалізованих FMS-платформ показав, що їх використання забезпечує інтеграцію виробничих, агрономічних, метеорологічних і геопросторових даних у межах єдиного інформаційного середовища. Це дозволяє автоматизувати процеси планування, моніторингу та контролю технологічних операцій, а також підвищити обґрунтованість управлінських рішень на всіх етапах вирощування сільськогосподарських культур.

2. У роботі доведено, що використання статистичних методів аналізу даних та інструментів цифрової аналітики дозволяє виявляти залежності між урожайністю та кліматичними факторами. На основі побудованої множинної лінійної регресійної моделі для кукурудзи отриману рівняння прогнозування урожайності з коефіцієнтом детермінації $R^2=0{,}48$.

3. Отримані результати підтвердили наявність помірного статистичного зв'язку між урожайністю кукурудзи та погодними показниками, насамперед кількістю опадів і середньою температурою. Практичне застосування інструментів Excel і Google Sheets із використанням статистичних функцій та пакету аналізу даних продемонструвало можливість виконання базового прогнозування урожайності навіть без використання складних програмних комплексів.

4. Дослідження показало високу ефективність застосування методів лінійного програмування для оптимізації виробничих процесів у рослинництві. На основі аналізу сучасних наукових кейсів встановлено, що використання LP-моделей дозволяє оптимізувати структуру посівних площ, планування сівозмін, використання ресурсів та вибір культур із урахуванням економічних і

технологічних обмежень. У наведених прикладах застосування LP забезпечувало зростання прибутковості господарств від 16,5 % до 68 %, а також підвищення ефективності використання земельних і матеріальних ресурсів.

5. Практичне дослідження можливостей FMS Soft.Farm підтвердило ефективність цифрових технологій у задачах агроскаутингу, моніторингу посівів та планування польових робіт. Встановлено, що інтеграція GPS-прив'язки, електронних карт полів, NDVI-карт, супутникового моніторингу та мобільного збору даних дозволяє оперативно виявляти проблемні ділянки, локалізувати зони стресу рослин і формувати рекомендації щодо диференційованого внесення ресурсів. Використання модулів «Сівозміна», «Посів», «Контроль висіву» та «Агроскаутинг» забезпечує комплексний контроль виробничих операцій і створює умови для переходу до принципів точного землеробства та Агрокультури 4.0.

6. Економічне обґрунтування впровадження FMS Soft.Farm підтвердило доцільність автоматизації управлінських процесів у агропідприємствах. Розрахунки показали, що лише за рахунок оптимізації контролю земельного банку, внесення добрив і витрат пального очікувана економія для господарства площею 1000 га може перевищувати 1,18 млн грн за сезон. При цьому прогнозовані витрати на впровадження та супровід системи становлять близько 225,7 тис. грн, що забезпечує окупність проєкту протягом одного виробничого циклу.

Отримані результати підтвердили, що цифровізація аграрного виробництва сприяє не лише скороченню витрат, але й підвищенню точності управлінських рішень, продуктивності виробництва та загальної рентабельності господарської діяльності.

Практичні аспекти виконання кваліфікаційної роботи мають достатньо систематизований набір результатів, які пройшли апробацію (Додаток Б) та можуть зацікавити фахівців, чия діяльність пов'язана з аграрним виробництвом, або розробкою і впровадженням інформаційних систем для аграрного сектору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вебінари в рамках дії програми «Підтримка діяльності підприємств АПК засобами сучасних інформаційних систем і технологій». ГО «ОСДС». URL: <https://surl.li/kefewx> (дата звернення: 07.05.2026).
2. Четверта промислова революція: зміна напрямів міжнародних інвестиційних потоків: монографія / За наук. ред. д. е. н., проф. А. І. Крисоватого та д. е. н., проф. О.М. Сохацької. Тернопіль: ФО-П Осадца Ю.В., 2018. 478 с.
3. Tobias Weber. Smart Farming – Industry 4.0 in Agriculture. *Emnify*: вебсайт: URL: <https://www.emnify.com/> (дата звернення: 07.05.2026).
4. Robert P. C. Site-specific Management for the Twenty-first Century. *Hort Technology*. 2000.10(3). Pp. 444–447. DOI: 10.21273/horttech.10.3.444.
5. What is the platform Industrie 4.0? Plattform Industrie 4.0: вебсайт. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Home/home.html> (дата звернення: 07.05.2026).
6. Юрчак О. Українська стратегія Індустрії 4.0 – 7 напрямів розвитку. URL: <https://industry4-0-ukraine.com.ua/2019/01/02/ukrainska-strategiya-industrii-4-0-7-napriankiv-rozvitku/> (дата звернення: 07.05.2026).
7. Alanoud Alotaibi, Farrukh Nadeem. A Review of Applications of Linear Programming to Optimize Agricultural Solutions. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business(IJIEEB)*. 2021. Vol.13. No.2. Pp. 11-21. DOI:10.5815/ijieeb.2021.02.02
8. Agriculture 4.0 – A Journey towards Sustainable Farming. *Infosys Germany - IT Business Services & Consulting - Overview*. URL: <https://www.infosys.com/iki/perspectives/journey-towards-sustainable-farming.html> (дата звернення: 07.05.2026).
9. Jonathan Brooks, Koen Deconinck and Céline Giner. Three key challenges facing agriculture and how to start solving them. 6 June 2019. *OECD*. URL: <https://www.oecd.org/agriculture/key-challenges-agriculture-how-solve/> (дата звернення: 07.05.2026).

10. Food Systems: Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. URL: <https://www.fao.org/food-systems/en/> (дата звернення: 07.05.2026).
11. Sustainable Food Systems. *One Planet network*: вебсайт. URL: <https://www.oneplanetnetwork.org/programmes/sustainable-food-systems/about> (дата звернення: 07.05.2026).
12. Emissions Gap Report 2022. *UNEP - UN Environment Programme*. URL: <https://surl.li/noeyny> (дата звернення: 07.11.2025).
13. Ravi Kumar G.V.V., Nampuraja Enose. Making Industry 4.0 real - using the Acatech I4.0 maturity index. 2018. *Infosys Germany - IT Business Services & Consulting - Overview*. URL: <https://www.infosys.com/engineering-services/white-papers/documents/industry-4.0-real.pdf> (дата звернення: 07.05.2026).
14. Lal, R., & Stewart, B.A. (Eds.). *Soil-Specific Farming: Precision Agriculture*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 431 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18759>.
15. Auernhammer, H. Precision farming – the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001. Vol. 30. Issues 1–3. P. 31–43. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00153-8).
16. Sewnet Getahun, Habtamu Kefale, Yohannes Gelaye. Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *The Scientific World Journal*, 2024. Vol. 2024. Issue 1. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>.
17. Никончук Є. Точне землеробство - козир в рукаві аграрія. *Latifundist*. URL: <https://latifundist.com/reportazhy/44-tochnoe-zemledelie--kozyr-v-rukave-agrariya> (дата звернення: 07.05.2026).
18. Kamilaris, A., Kartakoullis, A., Prenafeta-Boldú, F. X. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017. Vol. 143. P. 23–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>.
19. Rad, C. R., Hancu, O., Takacs, I. A., & Olteanu, G. Smart monitoring of potato crop: A cyber-physical system architecture model in the field of precision

agriculture. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2015. Vol. 6. P. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.041>.

20. Weltzien, C. Digital agriculture or why Agriculture 4.0 still offers only modest returns. *Agricultural Engineering*, 2016. Vol. 71(2). P. 66–68. DOI: <https://doi.org/10.1515/lt.2015.3123>.

21. De Clerq, M., Vats, A., Biel, A. *Agriculture 4.0 – The Future of Farming Technology*. The World Summit. URL: <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2018/feb/agriculture-4-0--the-future-of-farming-technology.html> (дата звернення: 07.05.2026).

22. Plant R. E.: Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2001. 30(1–3). pp. 9–29. DOI: 10.1016/S0168-1699(00)00152-6.

23. McBratney, A. B., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. Future Directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*. 2005. V6 (1). Pp. 7–23. DOI: 10.1007/s11119-005-0681-8.

24. Точне землеробство. *Agrilab*. URL: <https://www.agrilab.ua/services/tochne-zemlerobstvo/> (дата звернення: 07.05.2026).

25. Yuxin Miao, Mulla, D., Robert, P. An integrated approach to site-specific management zone delineation. *Frontiers of Journal Agricultural Science Engineering*. 2018. 5(4). Pp. 432–441. DOI: 10.15302/J-FASE-2018230.

26. Hornung A, Khosla R, Reich R, Inman D, Westfall D G. Comparison of site-specific management zones. *Agronomy Journal*. 2006. 98(2). Pp. 407–415. DOI: 10.2134/agronj2005.0240.

27. What is the plattform Industrie 4.0? URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Home/home.html> (дата звернення: 07.05.2026).

28. O. Kopishynska, Y. Utkin, O. Galych, M. Marenych and I. Sliusar, "Main Aspects of the Creation of Managing Information System at the Implementation of Precision Farming", *2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, 2020, pp. 404–410, doi: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125072.

29. Hornung A, Khosla R, Reich R, Inman D, Westfall D G. Comparison of site-specific management zones. *Agronomy Journal*. 98(2). 2006. pp. 407–415. DOI: 10.2134/agronj2005.0240.

30. Sørensen C. G., Pesonen L., Bochtisc D. D., Vougioukas S. G., Suomi P. Functional requirements for a future farm management information system. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 76. Issue 2. 2011. Pp. 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.005>.

31. Копішинська О. П., Уткін Ю. В. Шляхи реалізації проектно-орієнтованої моделі співпраці закладів вищої освіти, ІТ-компаній та агропідприємств при впровадженні інформаційних систем. *Вісник соціально-економічних досліджень: зб. наук. праць* (ISSN 2313-4569); за ред. М. І. Зверькова (голов. ред.) та ін. Одеса: Одеський національний економічний університет. 2018. № 1 (65). С. 197-206.

32. Digital farming's leading software platform that turns your field data into insights. URL: <https://www.climatefieldview.ca/> (дата звернення: 07.11.2025).

33. Soft.Farm - is a free software for organization and management of agricultural activities. URL: <https://www.soft.farm/en> (дата звернення: 12.11.2024).

34. Cropwise Operations. URL: <https://ua.cropwise.com/operations#features> (дата звернення: 07.05.2026).

35. Client-server architecture. URL: <https://training.qatestlab.com/blog/technical-articles/client-server-architecture/> (дата звернення: 07.05.2026).

36. Копішинська О. П., Уткін Ю. В., Маренич М. М. Ефективність впровадження систем точного землеробства в аграрних підприємствах. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія Економічні науки*. 2019. Вип. 34. С. 157-164.

37. Стандарти ISA-88 та IEC-61512 – ТК 185. *ТК 185 – Технічний комітет з питань промислової автоматизації*. URL: <https://tk185.appau.org.ua/61512/standard-iec-61512/standarts/> (дата звернення: 07.05.2026).

38. Григорчук В. Шляхи захисту інформації на об'єкті. *Матеріали науково-практичної конференції за підсумками проходження виробничих практик здобувачів вищої освіти спеціальності 126 Інформаційні системи та технології, кафедра інформаційних систем та технологій Полтавського державного аграрного університету, 10 жовтня 2024 р.* Вип. IX. Полтава: ПДАУ, 2024. С. 37-39.

39. Городецький О. С., Коваленко Р. В. Системи сучасних інтенсивних технологій: посібник до практ. і самост. робіт студентами агробіотехнологічного факультету за кредитно-трансферною системою навчання. Київ: КНТ, 2017. 64 с.

40. Переваги AgriLab. *AgriLab*. URL: <https://www.agrilab.ua/o-kompanii/> (дата звернення: 07.05.2026).

41. Muhammed Jaslam, P. K., Joseph, B., Paul Lazarus, T., & Rakhi, T. Determination of optimum crop mix for crop cultivation in Kerala homesteads. *Indian Journal of Agricultural Research*, 2018. Vol. 52. No. 1. P. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.18805/IJARE.A-4894>.

42. Render, B., Stair, R. M., & Hanna, M. E. *Quantitative Analysis for Management*. 11th ed. Pearson, 2012.

43. Upadhyaya, A. Application of optimization techniques for crop planning to improve farm productivity of ICAR-RCER, Patna, India. *Journal of AgriSearch*, 2017. Vol. 4. No. 1. P. 68–70. DOI: <https://doi.org/10.21921/jas.v4i01.7471>.

44. Pal, B. B., Goswami, S. B., Sen, S., & Banerjee, D. Using fuzzy goal programming for long-term water resource allocation planning in agricultural system: A case study. *Communications in Computer and Information Science*, 2012. Vol. 283. P. 170–184.

45. Taha, H. A. Modeling with Linear Programming. In: *Operations Research: An Introduction*. 8th ed. USA: Pearson Education, 1972. P. 13–14.

46. Kumari, P. L., Reddy, G. K., & Krishna, T. G. Optimum Allocation of Agricultural Land to the Vegetable Crops under Uncertain Profits using Fuzzy Multiobjective Linear Programming. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 2014. Vol. 7. No. 12. P. 19–28.

47. Heydari, M., Othman, F., Qaderi, K., Noori, M., & Parsa, A. S. Introduction to linear programming as a popular tool in optimal reservoir operation: a review. *Advances in Environmental Biology*, 2015. Vol. 9. No. 3. P. 906–917.
48. Wang, T., Wan, B., Xiao, C., & Feng, Y. The Linear Programming Model of Vegetables Transport Scheme Design. *International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2015)*, 2015. P. 282–284.
49. Islam, M. K., Alam, M. M., Uddin, M. F., & Faruque, G. M. Coordination and Profit Optimization by Producer-Distributor System of Agricultural Products in Bangladesh. *American Journal of Applied Mathematics*, 2020. Vol. 8. No. 1. P. 22–28.
50. Romero, J., & Smith, K. Crop profit optimization for farmers. *IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS 2016)*, 2016. P. 289–291. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIEDS.2016.7489320>.
51. Bhatia, M., & Rana, A. A mathematical approach to optimize crop allocation – A linear programming model. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2020. Vol. 15. No. 2. P. 245–252. DOI: <https://doi.org/10.18280/ij dne.150212>.
52. Mohamad, N. H., & Said, F. A mathematical programming approach to crop mix problem. *African Journal of Agricultural Research*, 2011. Vol. 6. No. 1. P. 191–197. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR10.606>.
53. Al-Nassr, R. S. M. The Optimal Crop Rotation of AL-RASHEED District Farms Using Linear Programming Technique. *Journal of Agricultural Science*, 2019. Vol. 50. P. 113–127.
54. Dury, J., Schaller, N., Garcia, F., Reynaud, A., & Bergez, J. E. Models to support cropping plan and crop rotation decisions: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012. Vol. 32. No. 2. P. 567–580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0037-x>.
55. Forrester, R. J., & Rodriguez, M. An Integer Programming Approach to Crop Rotation Planning at an Organic Farm. *UMAP Journal*, 2018. Vol. 38. No. 4. P. 5–25. URL: <http://www.comap.com/product/?idx=1617>.
56. IT-Enterprise. URL: <https://www.it.ua/> (дата звернення: 07.05.2026).

57. Manzoor, M. F. A review of machine learning techniques for precision agriculture and crop yield prediction. *Premier Journal of Plant Biology*, 2024. Vol. 1. P. 100005. DOI: 10.70389/PJPB.100005.

58. *Total Weather Data. Visual Crossing.* URL: <https://www.visualcrossing.com/weather-data/> (дата звернення: 30.11.2025).

59. *Superagronom.com.* URL: <https://surl.lt/inqkrr> (дата звернення: 07.05.2026).

60. О. Копішинська, М. Гарнаженко. Інтегровані цифрові сервіси для агроаналітики та моніторингу сільськогосподарських культур. *Стратегічний менеджмент агропродовольчої сфери в умовах глобалізації економіки: безпека, інновації, лідерство*: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 23 вересня 2025 р. Полтава: ПДАУ, 2025. Том 2. с. 291-294. DOI: <https://doi.org/10.32782/23-09-25-2>.

61. EOS Data Analytics успішно провела перевірку даних супутника EOS SAT-1. URL: <https://agrotimes.ua/tehnika/eos-data-analytics-uspishno-provela-perevirku-danyh-suputnyka-eos-sat-1/> (дата звернення: 07.05.2026).

62. Кущик А. П., Журавльова А. К. Оцінка привабливості інвестиційних проєктів. *Фінансові стратегії інноваційного розвитку економіки*. 2021. № 2 (50). С. 99–102. DOI: <https://doi.org/10.26661/2414-0287-2021-2-50-19>.

63. Ціни на бензин, дизпаливо, газ на АЗС України. *Minfin.* URL: <https://index.minfin.com.ua/markets/fuel/> (дата звернення: 07.11.2025).

64. Нітроамофоска-М NPK 7:17:21, 1 тонна, Україна. *Купити мінеральні NPK добрива в Україні: Ціни Виробника. Тетра Агро.* URL: https://tetra-agro.com.ua/products/nitroamofoska_m_npk_7_17_21 (дата звернення: 12.05.2026).

65. Тарифні пакети використання системи Soft.Farm. URL: <http://www.soft.farm/uk/site/cost> (дата звернення: 12.05.2026).