

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 магістр

на тему: **«Цифрові технології точного землеробства й агроаналітики в
забезпеченні сталого виробництва продукції рослинництва»**

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньою програмою
Інформаційні управляючі системи та
технології
спеціальності 126 Інформаційні
системи та технології
ступеня вищої освіти магістр
групи 126ІСТ_мд_2024
Гарнаженко Микола Анатолійович
Керівник: Копішинська Олена
Петрівна
Рецензент: Муравльов Володимир
В'ячеславович

Полтава – 2025 року

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

Освітня програма Інформаційні управляючі системи та технології
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Рівень вищої освіти другий (магістерський)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій УТКІН

«08» листопада 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Гарнаженка Миколи Анатолійовича

1. Тема кваліфікаційної роботи:
«Цифрові технології точного землеробства й агроаналітики в забезпеченні сталого виробництва продукції рослинництва»,
Керівник роботи: к. ф.-м. н., доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій Копішинська Олена Петрівна.
Затверджено наказом закладу вищої освіти від «31» жовтня 2025 року № 1332-ст
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи «09» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: наукові джерела наукометричних баз, дані інтернет-ресурсів, Microsoft Excel, Google Sheets, платформа відкритих кліматичних даних Visual Crossing Weather, IC (FMS) Soft.Farm
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Розділ 1. Теоретичні основи застосування цифрових технологій та інформаційних систем в управлінні продуктивністю аграрного виробництва
Розділ 2. Особливості моделювання агротехнічних даних методами лінійного програмування та на основі спеціалізованих інформаційних систем
Розділ 3. Практичні кейси 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	Калініченко О. В., к. е. н., доцент кафедри економіки та публічного управління	24.11.2025	04.12.2025

7. Дата видачі завдання «08» листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Вибір і затвердження теми роботи	29.10.2024 р.	
2.	Складання та погодження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	30.10.2024 р. – 08.11.2024 р.	
3.	Опрацювання джерел інформації	11.11.2024 р. – 27.12.2024 р.	
4.	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	30.12.2024 р.– 19.01.2025 р.	
5.	Виконання теоретико-методологічного розділу роботи	17.02.2025 р.– 16.05.2025 р.	
6.	Виконання дослідницько-аналітичного розділу роботи	02.06.2025 р.– 13.07.2025 р.	
7.	Виконання проектно-рекомендаційного розділу роботи	08.09.2025 р.– 14.11.2025 р.	
8.	Оцінювання економічної ефективності результатів дослідження	24.11.2025 р.– 04.12.2025 р.	
9.	Оформлення тексту роботи	05.12.2025 р.– 08.12.2025 р.	
10.	Попередній захист роботи на кафедрі	09.12.2025 р.	
11.	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	10.12.2025 р.- 14.12.2025 р.	
12.	Нормоконтроль	15.12.2025 р. – 16.12.2025 р.	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	18.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

Микола ГАРНАЖЕНКО

Керівник роботи

Олена КОПШИНСЬКА

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ, УПРАВЛІННЯ,
ПРАВА ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

ГАРНАЖЕНКО МИКОЛА АНАТОЛІЙОВИЧ

**«ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА Й
АГРОАНАЛІТИКИ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СТАЛОГО ВИРОБНИЦТВА
ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА»**

Освітньо-професійна програма
Інформаційні управляючі системи та технології
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Ступінь вищої освіти магістр

РЕФЕРАТ
кваліфікаційної роботи на здобуття кваліфікації –
магістр з інформаційних систем та технологій

Полтава – 2025 року

Кваліфікаційна робота складається із вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел (73 найменування), 2 додатки. Кваліфікаційна робота містить 5 таблиць, 21 рисунок, викладена на 72 сторінках.

Основний зміст роботи

У першому розділі «Теоретичні основи застосування цифрових технологій та інформаційних систем в управлінні продуктивністю аграрного виробництва» проведено комплексний аналіз змін в управлінні агроєкосистемами, що відбуваються під впливом застосування технологій Агрокультури 4.0, систематизований значний обсяг наукових публікацій вітчизняних та закордонних авторів, присвячених висвітленню головних трендів технологічного забезпечення галузі в розрізі точного землеробства та фреймворку технологій 4.0, розкрито головні аспекти досягнення цілей сталого розвитку для формування стійких продовольчих систем за участі сучасних інформаційних технологій.

У другому розділі «Особливості моделювання агротехнічних даних методами лінійного програмування та на основі спеціалізованих інформаційних систем» проаналізовані підходи до роботи з масивами та типами даних в агроєкосистемах, особливості їх отримання та моделювання. На основі численних прикладів проведено класифікацію задач, які найкраще розв'язуються методами лінійного програмування, комплексними методами та окреслені проблемні напрямки для пошуку інших засобів моделювання управлінських процесів галузі рослинництва. Для порівняння наведено варіанти використання відповідного математичного забезпечення та управління розподілом площ, плануванням оптимальних сівозмін, дохідних планів у середовищі FMS на прикладі вітчизняної ІС «Soft.Farm».

У третьому розділі «Практичні кейси здійснення цифрового аналізу, прогнозування та моніторингу даних галузі рослинництва» наведені оригінальні результати аналізу даних погодних умов та оцінювання їх впливу на урожайність на основі застосування статистичних методів (кореляційно-регресійний аналіз та ін.) і функцій Excel. Цифрове картування агровиробничих зон із використанням smart-технологій та агроскаутингу проведено в середовищі обраної ІС класу FMS Soft.Farm, модуль «Агроскаутинг» в якості інтегруючого програмного комплексу для будь-якого аграрного підприємства, яке є профільним у галузі рослинництва.

Висновки

1. Аграрне виробництво завдяки об'єктивним природним, світовим технічним та економічним процесам поступово перетворюється в одну з найбільш наукоємних сфер у розрізі Агрокультури 4.0, все більше використовує цифрові технології, системи точного землеробства, потребує сучасного програмного забезпечення, систем збирання і моніторингу даних, заснованих на потужних і безвідмовних комунікаціях. Окремі види даних можуть бути інтегровані та ефективно

опрацьовано лише на платформах спеціалізованих інформаційних управляючих систем.

2. Лінійне програмування з використанням симплекс-методу дозволяє оптимізувати план розподілу земель, що підвищує продуктивність і прибутковість господарств. Моделі змішаного цілочисельного лінійного програмування застосовуються для оптимізації структури посівів культур, планування сівозміни та зрошення, кормових раціонів і графіків зрошення, демонструючи стабільні результати та задоволеність користувачів. Усі розглянуті застосування LP демонструють можливість визначення оптимального допустимого рішення в заданих умовах.

3. Моделі на основі використання прогнозних функцій Excel LINEST здатні з достатнім рівнем точності прогнозувати врожайність. Функція підтримує аналіз як простої, так і множинної регресії, а в поєднанні з функціями INDEX, TRANSPOSE та IFERROR дає змогу створити адаптивні аналітичні моделі прямо в таблиці.

4. Методи проведення моніторингу даних (агроскаутінгу) та формування на електронних мапах геозон із проблемними характеристиками показано на основі FMS Soft.Farm, яка містить увесь необхідний набір модулів точного землеробства. Цифровий контур поля, інтеграція GPS-даних, NDVI та карт продуктивності створює повну просторову картину для аналітики. Таким способом агроскаутінг поєднує польову експертизу і smart-технології, забезпечуючи швидкі, економічні й дано-орієнтовані рішення для підвищення стабільності врожаїв.

5. Оцінювання ефективності впровадження й використання інформаційних систем в агропідприємствах показало, що основним джерелом досягнення економічного ефекту є підвищення точності обліку використання ресурсів (земельних, добрив, ЗЗР, насіння, робочого часу, ПММ та ін.), прийняття оптимальних рішень в управлінні всіма процесами. Загальний показник економії матеріальних виробничих витрат за середньостатистичним даними може складати до 30 % щорічного чистого прибутку.

Достовірність результатів роботи базується на використанні реальної ІС, даних відомих ІТ-компаній та аналітичних груп, які є відкритому доступі, застосуванні загально прийнятих методів і методик наукових досліджень та оцінювання даних.

Список публікацій здобувача

1. 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>

2. Гарнаженко М. А. Оцінювання показників економічної ефективності діяльності ІТ-компанії. *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, 22 жовтня 2025 р.* Вип. XI. Полтава: ПДАУ, 2025. С. 52-53.

АНОТАЦІЯ

Гарнаженко М. А. Цифрові технології точного землеробства й агроаналітики в забезпеченні сталого виробництва продукції рослинництва.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістр за освітньо-професійною програмою Інформаційні управляючі системи та технології спеціальності 126 Інформаційні системи та технології. Полтавський державний аграрний університет. Полтава, 2025.

Досліджено теоретичні та прикладні аспекти статистичної агроаналітики та функціоналу ІС для прогнозування даних і моніторингу стану агроєкосистем. Проведений цифровий аналіз впливу погодних умов на урожайність із застосуванням пакету аналізу даних і статистичних функцій (COUNTIF, CORREL, IF та ін.), багатофакторної моделі лінійної регресії в Google таблицях..

Ключові слова: Агрокультура 4.0, точне землеробство, COUNTIF, CORREL, лінійне програмування, агроскаутинг, Soft.Farm

ANNOTATION

Harnazhenko M. A. Digital Technologies of Precision Agriculture and Agro-Analytics in Supporting Sustainable Crop Production.

Master's qualification thesis for the degree of Master of Higher Education under the educational and professional program «Information Management Systems and Technologies», specialty 126 Information Systems and Technologies. Poltava State Agrarian University. Poltava, 2025.

The thesis investigates theoretical and applied aspects of statistical agro-analytics and the functionality of information systems for data forecasting and agroecosystem condition monitoring. A digital analysis of the impact of weather conditions on crop yield was carried out using the Data Analysis Toolkit and statistical functions (COUNTIF, CORREL, IF, etc.), as well as a multifactor linear regression model implemented in Google Sheets.

Keywords: Agriculture 4.0, precision farming, COUNTIF, CORREL, linear programming, agroscouting, Soft.Farm

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В УПРАВЛІННІ ПРОДУКТИВНІСТЮ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА	11
1.1 Комплексні зміни в управлінні агроєкосистемами під впливом фреймворку технологій Агрокультури 4.0.....	11
1.2 Впровадження точного землеробства й стійкі продовольчі системи як стратегія досягнення цілей сталого розвитку	15
1.3 Обґрунтування складу та функціональних характеристик інформаційних систем для автоматизації управління виробничими процесами аграрних підприємств	22
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ АГРОТЕХНІЧНИХ ДАНИХ МЕТОДАМИ ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ ТА НА ОСНОВІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ	29
2.1 Особливості роботи з масивами даних в агроєкосистемах при впровадженні інформаційних систем у виробничу діяльність агропідприємств.....	29
2.2 Застосування інструментарію лінійного програмування при оптимізаційному моделюванні показників аграрного виробництва.....	33
2.3 Застосування алгоритмів лінійного програмування при вирішенні оптимізаційних задач в аграрному виробництві та в середовищах FMS	40
2.3.1 Розв'язання типових задач в рослинництві методами LP	40
2.3.2 Реалізація алгоритмів лінійного програмування в спеціалізованих інформаційних системах управління аграрним виробництвом	45
Висновки до розділу 2.....	51
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ КЕЙСИ ЗДІЙСНЕННЯ ЦИФРОВОГО АНАЛІЗУ, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДАНИХ ГАЛУЗІ РОСЛИННИЦТВА.....	53

3.1 Застосування статистичних методів аналізу даних погодних умов та оцінювання їх впливу на урожайність.....	53
3.2 Цифрове картування агровиробничих зон із використанням smart-технологій та агроскаутингу.....	59
3.3 Обґрунтування ефективності впровадження систем автоматизації виробничих процесів та цифрової аналітики в аграрних підприємствах	64
Висновки до розділу 3	68
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТКИ	81

ВСТУП

Першочерговим завданням аграрного виробництва на сьогодні є забезпечення населення продуктами харчування й сталого розвитку агроecosystem в складних умовах конкурентності, кліматичних змін, а також в умовах війни для України. Аграрний напрямок має значний потенціал і потребує новітніх комбінацій і взаємодії цифрових технологій, раціональних економічних підходів, всебічної інформаційної підтримки, що є головним трендом формування якісно нового рівня управління аграрним виробництвом, особливо в галузі рослинництва.

Актуальність теми дослідження кваліфікаційної роботи пов'язується з необхідністю пошуку й вдосконалення методів обробки великих обсягів даних, що супроводжують виробничі, управлінські процеси в аграрному секторі економіки, а також врахування при цьому зовнішніх природних чинників, якими є кліматичні показники, природні умови вирощування агрокультур.

Збір, ефективний облік, аналіз даних, встановлення типів залежностей та створення прогнозних моделей мають значний вплив на прийняття рішень та ефективність виробництва продукції рослинництва.

Точне землеробство є ключовим напрямом у цифровій трансформації сільського господарства. Смарт-технології займають важливе місце у сучасному світі, особливо в галузі сільського господарства, де вони забезпечують високий рівень автоматизації, точності та ефективності. Існує значний кластер напрацювань методологій застосування традиційних програмних засобів та спеціалізованих інформаційних систем, які дозволяють вирішувати чимало задач моделювання й прогнозування аграрних даних.

Особливості впровадження систем точного землеробства висвітлені в роботах Планта Р., МкБретні А., Горнунга А., Вестфолла Д., статтях Нікончука Є., Маренича М., Мороз С., Нужної С., Уткіна Ю. та ін. Однак, варіативність застосування тих чи інших методів, дослідження їхньої точності, досконалості, альтернативних шляхів пошуку рішень є на сьогодні предметом активних

наукових досліджень для подальшого запровадження в практику фахівців агропідприємств, сумісних науково-ємнісних розробок і проєктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота відповідає дослідженням в межах науково-дослідної ініціативної теми «Організаційно-методологічні аспекти впровадження інформаційно-комунікаційних систем і технологій в управлінні діяльністю сучасних організацій та підприємств за умов переходу до цифрової економіки» (ДРН 0123U105060, 2023-2028 рр.), а також обласних програм «Підтримка діяльності підприємств АПК засобами сучасних інформаційних систем і технологій», «Програма розвитку та підтримки аграрного комплексу Полтавщини за пріоритетними напрямками на період до 2027 року», затверджених Департаментом агропромислового розвитку Полтавської обласної державної (військової) адміністрації з 2021 р. [1].

Метою кваліфікаційної роботи є формування методологічних підходів щодо застосування статистичних методів аналізу даних для оцінювання тенденцій змін погодних умов та кореляції врожайності, прогнозування урожайності, а також ефективність застосування спеціалізованих інформаційних систем для агромоніторингу при вирощуванні продукції рослинництва.

Завданнями кваліфікаційної роботи є:

- визначення ролі інформаційних систем та технологій в управлінні виробничими процесами агропідприємств у контексті Агрокультури 4.0;
- аналіз світових трендів наукових досліджень щодо активності й результативності використання спеціалізованих інформаційних систем і цифрових технологій в роботі агронома, фермера;
- дослідження впливу кількох факторів на показник урожайності культур із застосуванням традиційних методів та побудови спеціальних програмних модулів для врахування малокорелюючих факторів;
- реалізація практичних кейсів для проведення цифрового аналізу даних, отриманих із доступних джерел супутникових знімків, погодних умов, а також методів оцінювання їх впливу на урожайність із використанням доступного

програмного забезпечення, зокрема, спеціалізованих статистичних функцій Google таблиць або пакету аналізу Microsoft Excel;

– аналіз характеристик існуючих інформаційних систем на ринку програмного забезпечення для аграрних підприємств з реалізацією функціоналу моніторингу даних;

– демонстрація переваг здійснення комплексного моніторингу посівів із використанням сучасних технологій для збору та аналізу даних про стан сільськогосподарських культур на прикладі обраної інформаційної системи, оцінювання ефективності її використання в галузі рослинництва.

Об'єктом дослідження є процеси збору й систематизації спеціалізованої технологічної інформації галузі рослинництва та моделювання показників засобами статистичних функцій як загальнодоступних програм, так і спеціально розроблених програмних модулів.

Предметом дослідження є функціональні можливості й взаємодія різних видів цифрових технологій та інформаційних систем у досягненні ефективних методів прогнозування показників, що є критично важливими в управлінні продуктивністю агроєкосистем аграрних підприємств.

Методи дослідження: інформаційно-пошуковий, аналітико-синтетичний, емпіричний, множинної лінійної регресії, статистичного моделювання, прогнозування показників, програмно-прикладний, порівняльний, графічний.

Інформаційна база кваліфікаційної роботи складається з матеріалів наукових публікацій, розміщених у відомих науково-метричних базах даних, бази супутникових знімків у відкритому доступі, статистичних даних Держстату, матеріалів наукових конференцій щодо досягнень Індустрії 4.0, офіційних вебсайтів розробників прикладного програмного забезпечення, а також експериментальних даних ІТ-компаній, які здійснюють впровадження інформаційних систем для агробізнесу на прикладі окремих підприємств.

Елементи наукової новизни роботи проявляються в систематизації підходів до вибору, методів застосування і комбінування програмно-технічних рішень при дослідженні зв'язку впливаючих факторів і прогнозних показників

продуктивності агроєкосистем на тлі невідвратної інформатизації та цифровізації всіх виробничих процесів агросфери в цілому.

Практична значущість роботи полягає в здійсненні критичного аналізу і узагальнення інформації значного обсягу наукових джерел щодо сучасних трендів оцінювання та прогнозування різноманітних показників в агровиробництві, зокрема, кліматичних і урожайності культур. Проведені статистичні дослідження із застосуванням інструментів електронних таблиць демонструють, що відкрита погодна статистика та доступні офісні інструменти дозволяють кількісно оцінити вплив опадів і температури на врожайність агрокультур в будь-якому регіоні. Отримані результати можуть допомогти аграріям приймати вивірені рішення щодо вибору агротехнологічних заходів для отримання стійкого урожаю та збереження ресурсів. Такі підходи ефективні в регіонах із обмеженим доступом до складних аналітичних систем, оскільки не потребують додаткового спеціального програмного забезпечення.

Апробація результатів дослідження відбувалася шляхом оприлюднення доповідей на міжнародній та всеукраїнській студентській науково-практичних конференціях.

Публікації. За результатами проведеного дослідження опубліковано тези: «Інтегровані цифрові сервіси для агроаналітики та моніторингу сільськогосподарських культур», III Міжнародна науково-практична конференція, 23 вересня 2025 р. (м. Полтава, Україна); «Оцінювання показників економічної ефективності діяльності ІТ-компанії», науково-практична конференція за підсумками проходження виробничої практики здобувачів вищої освіти, кафедра ІСТ Полтавського державного аграрного університету, 29 жовтня 2025 р. (м. Полтава, Україна).

Структура і обсяг кваліфікаційної роботи: пояснювальна записка викладена на 71 сторінці і складається зі змісту, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 73 найменувань. Робота містить 5 таблиць і 21 рисунок, 2 додатки.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В УПРАВЛІННІ ПРОДУКТИВНІСТЮ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Комплексні зміни в управлінні агроєкосистемами під впливом фреймворку технологій Агрокультури 4.0

Цифрові технології є тісно інтегрованими в будь-які виробничі процеси всіх без виключення галузей економіки та суспільного життя: це твердження є об'єктивним, зафіксованим у численних документах, стандартах фактом, обговорюється на світових самітах. Однак, цифрові перетворення і панування інформаційних технологій відбуваються настільки стрімко, революційно, що окремі напрямки й галузі, в силу специфіки та попереднього технічного розвитку, відстають від сучасних реалій та й досі зважують аргументи щодо доцільності масштабного переходу на новий рівень управління й обробки інформації. Саме в таких умовах часто опиняються аграрні підприємства, представники яких ментально або технологічно не готові до запровадження повного комплексу інформаційних систем в управління виробничими процесами й досягнення рівня Агрокультури 4.0 [2]. Така ситуація має історичні та інші об'єктивні причини.

Сільське господарство докорінно трансформувалося в попередньому столітті. Електромеханічна революція на початку ХХ століття принесла механізацію фермерських господарств, зменшуючи потребу у фізичній праці. Зелена революція в середині ХХ століття сприяла збільшенню врожайності, що істотно забезпечило постачання достатньо їжі для швидко зростаючого світового населення. Разом із тим, надмірне прийняття методів зеленої революції та машинних технологій призвели до декількох несприятливих наслідків, у т. ч. втрату родючості ґрунтів, виснаження та забруднення водних ресурсів, а також збільшення захворювань на худобу та людських захворювань. Однак, сільське

господарство переживає «цифрову революцію» з величезним потенціалом для покращення життя та засобів до існування фермерів у всьому світі.

У 2018 р. відбувся світовий урядовий саміт, за результатами якого був опублікований фундаментальний звіт «Agriculture 4.0 – the future of farming technology» [3]. На саміті було показано мапу технологій, згідно якої перехід до Агрокультури 4.0 передбачає в єдиному ланцюжку від поля до столу використання технологій Індустрії 4.0 (рис. 1.1).

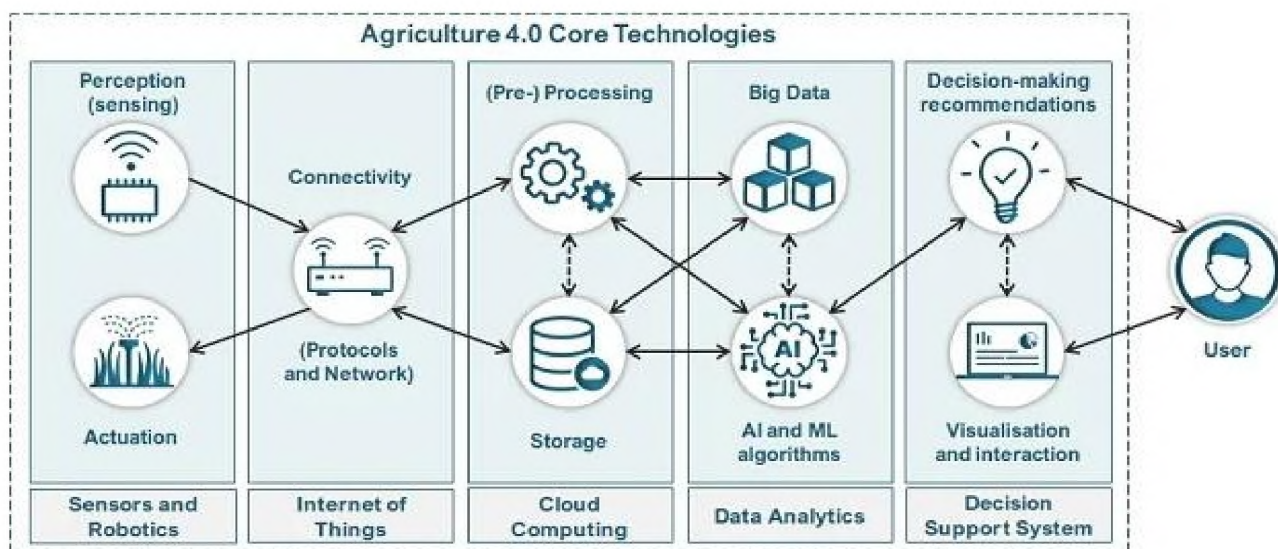


Рисунок 1.1 – Фреймворк основних технологій Agriculture 4.0 [3]

У теоретичній частині звіту обґрунтовано, що «...фермами та сільськогосподарськими операціями доведеться керувати зовсім по-різному, насамперед, через досягнення в таких технологіях, як датчики, пристрої, машини та інформаційні технології». Згідно зроблених прогнозів сучасне сільське господарство вже сьогодні масово використовує такі складні технології, як роботи, датчики температури, хімічного складу та вологості, аерофотознімки та технології систем глобального позиціонування GPS (англ. Global Positioning System). Ці передові пристрої та точне землеробство і роботизовані системи дозволяють фермам бути більш прибутковими, ефективними, безпечними та екологічно чистими [4]. Беззаперечно, застосування цифрових інформаційних технологій (ІТ) відбувається вкрай нерівномірно з низки об'єктивних та суб'єктивних причин.

Виробництво продукції сільського господарства історично засноване на використанні традиційних ресурсів – земельних, водних, енергетичних, людських, біологічних, більшість з яких є невідновлювальними або вичерпними.

Специфічність новітніх агротехнологій розглядається в кількох площинах. З одного боку, необхідна системна робота з усіма виробничими, екологічними, метеорологічними, статистичними (традиційними) даними, і операції з такими даними зручно здійснювати на основі оцифрування, автоматизації збору та обробки за допомогою інформаційних систем. З іншого боку, технології швидко вдосконалюються. Можна використовувати все нові й нові комплекси із відмінними характеристиками, у тому числі, з перенесенням операцій в хмари. При цьому необхідне широке застосування комунікацій на основі інтернету, здійснюючи передавання даних безпосередньо із місць виробництва, тобто «з поля». Потрібно зазначити, що збір оперативних даних в аграрному виробництві та їх оцифрування, застосування елементів «розумних» пристроїв та технологій не є достатнім для переходу на рівень Агрокультури 4.0, яка передбачає значно ширший спектр інформаційних систем та технологій (ІСТ).

Представлені в різних джерелах результати просування інформаційних технологій в аграрному виробництві показують, що визначення ефективних методів переходу на рівень Агрокультури 4.0 не є стрибкоподібним та передбачає застосування багатьох різних технологій і систем [5-6].

Агрокультура 4.0 є частиною четвертої хвилі промислової революції, яка пропонує ідеальний стан повністю автономного та оптимізованого виробництва на виробництві. Автономне землеробство можливе завдяки ефективній інтеграції фізичних і цифрових технологій із поступовим переходом від ручного до автоматичного, до напівавтономного й, зрештою, до повністю автономних операцій (рис. 1.2). Тепер клієнти вимагають прозорості та відстеження походження їжі, яку вони купують.

Окрім ефективності, технології Індустрії 4.0 забезпечують основу для проактивного відстеження в агропродовольчому ланцюгу за допомогою цифрових технологій для досягнення Агрокультури 4.0 [7].

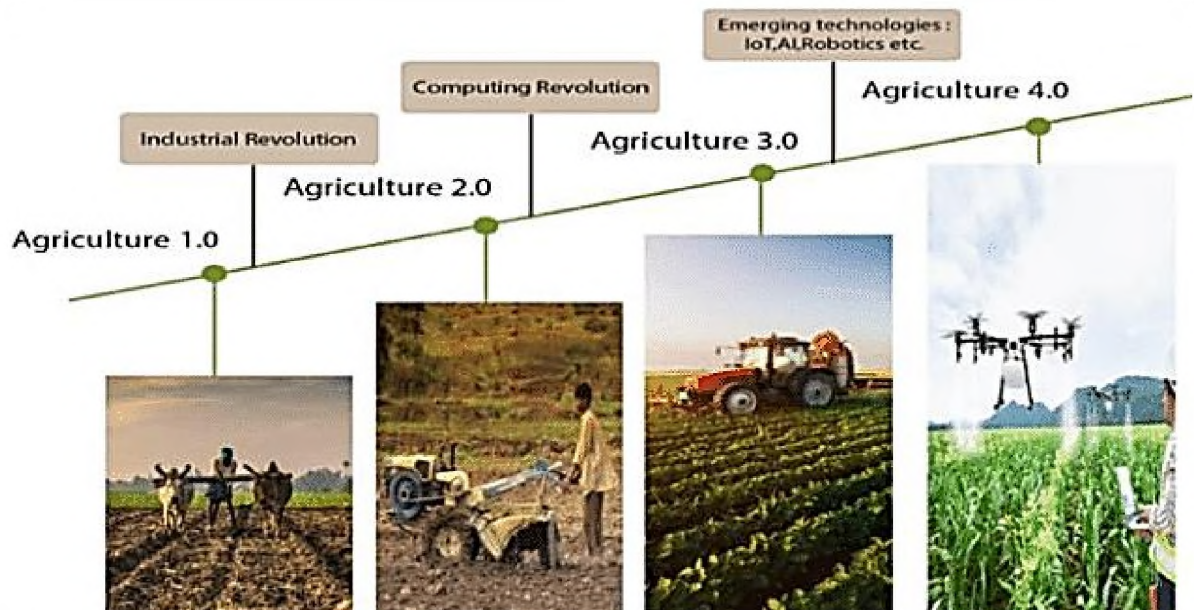


Рисунок 1.2 – Прогрес автономії агровиробництва на різних рівнях фізичних і цифрових технологій [7]

Принципи Індустрії 4.0 – видимість параметрів, прозорість для розуміння того, чому відбуваються події, передбачуваність для проактивного моделювання та автономність для роботи без втручання людини – широко застосовуються і до Агрокультури 4.0. яка поєднує в собі науку та технології шляхом реінжинірингу всього ланцюга створення вартості попиту та пропозиції.

Смарт-технології займають важливе місце у сучасному світі, особливо в галузі сільського господарства, де вони забезпечують високий рівень автоматизації, точності та ефективності.

Інститут знань Infosys, який є світовим лідером у сфері цифрових послуг і консалтингу нового покоління пропонує цифрові технології як інноваційні рішення для продуктивності сільського господарства, пом'якшуючи пов'язані з цим ризики, спираючись на положення, які сформульовані нижче [8].

1. Агрокультура 4.0 є частиною четвертої хвилі промислової революції або Індустрії 4.0.

2. Конвергенція цифрового та фізичного світів у сільському господарстві відбувається паралельно з інтеграцією ІТ та операційних технологій (ОТ), ІТ-ОТ в Індустрії 4.0.

3. Програмне забезпечення з відкритим кодом, архітектури, фреймворки та API підтримують доступні цифрові технології.

4. Ройовий інтелект відіграватиме ключову роль для автономного землеробства в децентралізованому режимі самонавчання.

Технології можуть допомогти збалансувати взаємопов'язані сторони трикутника продуктивність (збільшення продовольства)-зайнятість-стійкість, як схематично представлено на рис. 1.3. Вони пропонують доступні та інноваційні рішення для підвищення продуктивності, одночасно зменшуючи економічні та екологічні ризики [9].

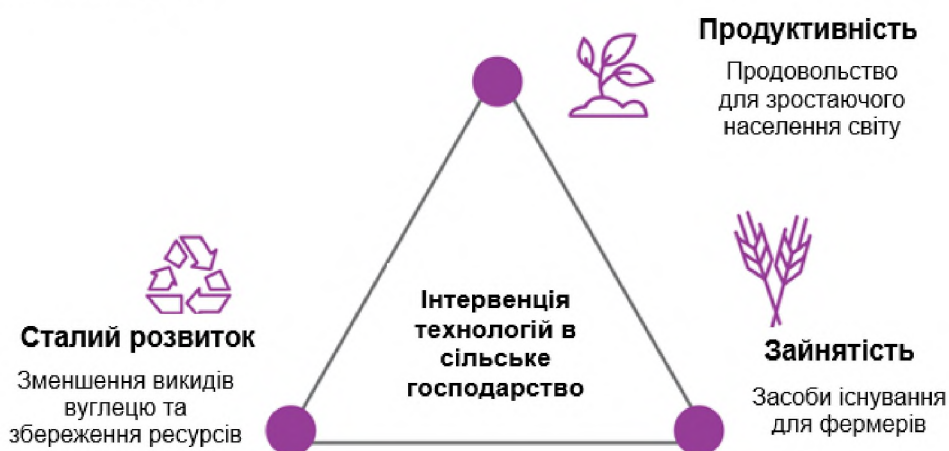


Рисунок 1.3 – Технології збалансовують продуктивність, зайнятість і стійкість

У той час, як кілька галузей промисловості визначили технології сталого розвитку та кліматичної стійкості, сільське господарство ще не зробило цього в масштабах. Понад 25% населення планети потребуватимуть впровадження екологічних методів землеробства для сталого майбутнього, враховуючи фрагментарний характер цього сектора.

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

На сьогодні галузі сільськогосподарського виробництва це дещо більше, ніж просто традиційний погляд на виробництво продуктів харчування.

Агропродовольчі системи (АС) – це комплекс взаємодій між людьми, технологіями та природними ресурсами, які забезпечують виробництво, переробку, транспортування, зберігання та споживання продуктів харчування. Ці системи є складними та залежать від багатьох факторів, таких як клімат, ґрунти, водні ресурси, технології, економіка, політика та культура [10].

Агропродовольчі системи можна класифікувати за ефективними критеріями. Характеристика кількох типів АС наведена далі.

1. Традиційні системи, які традиційно базуються на місцевих знаннях та традиціях і забезпечують виробництво продуктів харчування для місцевого споживання. В Україні це малі та середні господарства, моногалузеві (прикладом, ферми з овочівництва або тваринницькі комплекси) або змішаного типу.

2. Екологічно орієнтовані системи: такі системи традиційно базуються на принципах сталого розвитку та забезпечують виробництво продуктів харчування, які не завдають шкоди навколишньому середовищу. Це здебільшого системи органічного землеробства (органічного виробництва). Популярність таких систем в Україні й світі зростає завдяки високому попиту й більшій вартості продукції. Органічне виробництво включає продукцію рослинництва з дотриманням екології ґрунтів, а також тваринництва на натуральних кормах.

3. Системи промислового виробництва: фактично використовують для виробництва продуктів харчування на промисловій основі та забезпечують велику кількість продуктів харчування для масового споживання.

4. Інтенсивні системи: ці системи фактично спрямовані для виробництва продуктів харчування у великій кількості і забезпечують високу продуктивність.

Продовольча та сільськогосподарська організація Об'єднаних націй реалізує програму «Стійкі продовольчі системи» (Sustainable Food Systems, SFS) – це партнерство з багатьма учасниками, спрямоване на активізацію невідкладної трансформації до стійких продовольчих систем як критичної стратегії для досягнення цілей сталого розвитку [11]. Розглянемо більш детально заходи, які включені до світових програм з метою збільшення виробництва продовольства та зменшення навантаження на природні ресурси та екологічні системи.

Завдяки спільному баченню інклюзивних, різноманітних, стійких, здорових і стійких продовольчих систем в багатьох країнах налагоджена спільна діяльність на місцях для більш узгодженої та цілісної політики щодо вирішення складних проблем продовольчих систем. Для цього програма SFS сприяє «системному» підходу, який стосується продовольчої системи в цілому, беручи до уваги взаємозв'язки між елементами та учасниками продовольчих систем і необхідні компроміси.

Системний моніторинг показує, що наша планета здатна забезпечити зростаюче населення достатньою кількістю поживної та різноманітної їжі зараз і в майбутньому. Однак, у 2022 р. близько 826 млн людей голодували, що на 46 млн збільшилося за 5 років. Тим часом, приблизно 30% дорослого населення планети має надлишкову вагу або страждає ожирінням, а близько 30% їжі, виробленої в усьому світі, втрачається або витрачається даремно [12]. Зростає глобальний консенсус щодо того, що така ситуація є неприйнятною, і що існуючі продовольчі системи потребують глибокої трансформації, щоб усунути основні причини їх недостатньої ефективності з точки зору стійкості та справедливості.

Технологічне втручання в сільське господарство загалом відбувається через фізичні шляхи, шляхом автоматизації завдань за допомогою техніки та цифрових шляхів, забезпечуючи інформаційні потоки, які допомагають своєчасному прийняттю ключових рішень. Параметри ґрунту, погодні умови та ціни на товари є прикладами даних, які допомагають фермерам вживати заходів щодо ефективності та підвищення врожайності.

Очікується, що автономне землеробство забезпечить більш стійкі моделі «від ферми до столу» і економічно ефективні рішення по всьому ланцюжку створення вартості завдяки постійному моніторингу полів, посівів, машин і погоди в реальному часі. Потенційні випадки використання включають оптимізацію шляху; зона покриття; використаний час техніки на оранку, культивацію та збирання врожаю; зниження операційних витрат; підключення процесів для моніторингу врожаю в реальному часі; матеріально-технічне забезпечення сільськогосподарського виробництва [13].

Сучасні системи та технології роботи з даними потребують інтеграції з мережами 5G, вдосконаленими автономними системами на основі ШІ, підключеними службами та інтелектуальними хмарними службами для наскрізної автоматизації робочого процесу. Автономні трактори та обладнання для прополки зведуть до мінімуму втручання людини, виключать помилки та заощадають енергію. Завдяки службам визначення місця розташування в реальному часі з мережами 5G різноманітне підключене сільськогосподарське обладнання виконує всі технологічні операції. Аналітика даних на основі штучного інтелекту (ШІ) покращить підключені інтелектуальні технології зрошення, щоб оптимізувати споживання ресурсів і виконати головну вимогу фермерів щодо зниження загальної вартості володіння.

Завдяки реалізації підходів до ПЗ з відкритим вихідним кодом, архітектур, фреймворків і стандартизованих інтерфейсів прикладного програмування (API), інтегровані платформи приймають дані, використовують робочий процес і забезпечують поєднання каналів даних із механізмами прийняття рішень на основі ШІ. Крім того, архітектури повинні використовувати сильні принципи модульного та гнучкого ПЗ, мікросервісів і непатентованих програмно-незалежних моделей.

Платформи сторонніх розробників, які обслуговують погоду, управління складом, керування автопарком та електронну комерцію, можуть керувати API через рівні абстракції, де відбуватиметься налаштування.

Ключовим напрямом у цифровій трансформації сільського господарства є точне землеробство. Цей підхід базується на аналізі просторових та часових даних про поля, що дозволяє оптимізувати агротехнічні процеси, зменшити витрати ресурсів і підвищити врожайність [14].

Довгий час панувала думка, що «точне землеробство» майже завжди асоціюється з удобренням, орієнтованим на конкретну ділянку. Однак, з часом межі уявлень значно розширилися, і точне землеробство стало відправною точкою для перегляду використання доступної землі як такої, а також врахування мінливості та неоднорідності навколишнього середовища [15]. На основі

значного обсягу експериментальних даних описані технологічні основи просування та впровадження точного землеробства, які здатні вирішувати проблеми нестачі ресурсів, проблеми навколишнього середовища та зміни клімату [16].

Об'єктивно, розвиток технологій точного землеробства розпочався в кінці ХХ століття з появою перших електронних засобів збору даних та супутникової навігації. Наступні ключові кроки відбулися в 1990-х: перші бортові системи моніторингу врожайності з'явилися у 1992 році, коли було створено сенсор, що вимірює кількість зібраного врожаю з прив'язкою до координат; у 1996 році вперше випробувано автоматичне водіння трактора за сигналом GPS. Названі процеси ініціювали автоматизацію збору, збереження та частковий аналіз даних. Відлік впровадження систем і технологій «розумного», або точного землеробства в найбільш розвинутих країнах Західної Європи, Північної Америки, Японії розпочалося з 80-х рр. В Україні цей процес активізувався на початку 2000-х рр. Першими були холдинги, які мали значний земельний банк (десятки тисяч гектарів) і змогли інвестувати в обладнання й запровадити технології, а з часом поширювати власний досвід [17]. Менші за розмірами підприємства, фермерські господарства переймають цей досвід, але використовують не в повному обсязі.

Інформаційною складовою точного землеробства є інформаційні процеси, як включають збір, передавання, зберігання і використання величезних обсягів даних, і науковці активно досліджують та використовують методи моніторингу і аналізу великих даних для підтримки прийняття рішень.

Ґрунтовний огляд опублікованих робіт про методи обробки великих даних та їх ефективність, доцільність, інструменти, наприклад, представлено в роботі [18]. Автори підкреслюють велике значення і можливості аналізу великих даних у сільському господарстві для більш розумного землеробства, показуючи, що наявність апаратного та програмного забезпечення, методів та методик аналізу великих даних, а також зростаюча відкритість джерел великих даних, сприятимуть більшій кількості академічних досліджень, ініціатив державного

сектору та бізнес-проектів у сільськогосподарському секторі. Як і в інших працях, відмічається існування об'єктивних та суб'єктивних обмежуючих факторів, які стримують повний перехід на автоматизовані системи обробки даних та прийняття рішень в агросекторі.

У контексті точного землеробства під смарт-технологіями розуміють сукупність інноваційних рішень, що включають використання дронів, датчиків Інтернету речей (IoT), супутникових систем, штучного інтелекту (ШІ) та спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу даних. Їх основна мета – допомогти аграріям приймати обґрунтовані рішення, підвищити продуктивність виробництва та знизити витрати ресурсів [19]. В сучасній агроіндустрії такі цифрові рішення часто об'єднують під термінами «смарт-фермерство» або «Agriculture 4.0», які підкреслюють цифрову трансформацію галузі [20, 21].

Досвід передових країн світу демонструє, що найбільший потенціал в аграрній сфері має точне землеробство, яке здатне значно підвищити продуктивність галузі рослинництва і зменшити рівень ресурсних, матеріальних та інших витрат у виробничих ланках, кардинально змінюючи агробізнес.

Точне землеробство визначається як деяка нова концепція впровадження технологій у рослинництві на основі електронних супутникових картографічних засобів, використання точних дистанційних даних, отриманих зі знімків супутника чи дрона, а також методів обробки цих даних [4].

Серед світових науковців та практиків інтерес до точного землеробства є стабільно високим. Системний аналіз змісту існуючих визначень точного землеробства, тенденцій і форм його впровадження у багатьох країнах світу подано в роботах Планта, МкБретні та ін. [22, 23]. Базисом наукового підґрунтя концепції точного землеробства є визнання фактів існування певних неоднорідностей в межах кожного поля, що обробляється, наявність його специфічних характеристик. Для їх збору, оцінювання, моніторингу вже застосовуються такі сучасні технології, як системи глобального позиціонування GPS, різноманітні датчики, аерофотознімки і супутникові знімки, а також спеціальні програми на базі геоінформаційних систем (ГІС) [24-26].

Таким чином, точне землеробство – це комплексна високотехнологічна система сільськогосподарського менеджменту, що включає:

- технології глобального позиціонування (GPS);
- географічні інформаційні системи (GIS);
- технології оцінки врожайності (Yield Monitor Technologies);
- технологію змінного нормування (Variable Rate Technology);
- технології дистанційного зондування землі (ДЗЗ), які здійснюються за допомогою супутників або агродронів;
- рішення технології «інтернет речей» (Internet of Things, IoT).

Напрями застосування точного землеробства:

- агрономічний: з урахуванням реальних потреб культури в добривах, ЗЗР, удосконалюється агровиробництво;
- технічний: досконаліший тайм-менеджмент на рівні господарства (в тому числі, поліпшується планування сільськогосподарських операцій);
- екологічний: скорочується негативний вплив сільгоспвиробництва на навколишнє середовище (більш точна оцінка потреб культури в добривах, ЗЗР, призводить до обмеження застосування їх внесення);
- економічний: зростання продуктивності і / або скорочення витрат підвищують ефективність агробізнесу (в тому числі, скорочуються витрати на внесення азотних добрив).

Іншими словами, точне землеробство – це поєднання досвіду і навичок людини із сучасними технологіями. Методологія впровадження системи точного землеробства за послідовними кроками:

1. Точне визначення місця і причин виникнення проблем, що спричиняють втрати врожайності і збільшення собівартості виробництва продукції.
2. Документування проблеми, операцій в полі та прогноз можливого результату.
3. Визначення фінансової складової вирішення або не вирішення проблеми.
4. Пріоритезація проблем.

5. Впровадження технологічних рішень.
6. Оцінка результатів.

Представлені в різних джерелах результати просування інформаційних технологій в аграрному виробництві показують, що визначення ефективних методів переходу від точного землеробства на рівень Агроіндустрії 4.0 не є стрибкоподібним та передбачає застосування багатьох різних технологій і систем [27]. Зрештою, перехід неможливо здійснити без застосування управляючої інформаційної системи, що дозволить проводити розрахунки для всіх видів робіт та прийняття необхідних рішень.

1.3 Обґрунтування складу та функціональних характеристик інформаційних систем для автоматизації управління виробничими процесами аграрних підприємств

Велика частина впровадження технологій 4.0, особливо великих даних і ШІ, базується на тому, що ці дані вже попередньо оцифровані на рівні збирання. Тобто на підприємствах уже налагоджено облік та встановлено датчики: досягнуто рівень 3.0. У контексті аграрних підприємств цей рівень відповідає організації систем точного землеробства.

Слід зауважити, що аграрна галузь є доволі інерційною щодо інновацій. Аналіз головних обмежуючих (уповільнюючих) факторів, з якими найчастіше стикаються при впровадженні цифрових технологій та систем в аграрному виробництві, проведено в окремих наукових дослідженнях [28]. До цих факторів відносять явища технічного характеру, зокрема: невідповідність поділу на зони управління (масиви полів) [29]; неготовність до обробки в єдиній системі великих обсягів даних, отриманих від численних датчиків та супутників, дронів тощо; несумісність окремих систем в обслуговуванні одного підприємства через різні стандарти, низький рівень якості забезпечення доступу до мережі інтернет у сільській місцевості. Особливу роль грає в цьому ж контексті рівень готовності

персоналу до інновацій та рівень цифрових знань. Дослідники багатьох країн приділяють цьому фактору особливу увагу і вважають, що головною перешкодою є не технології, техніка, і навіть не фінанси. Основною перешкодою всюди у світі є культура організації та готовність персоналу [30].

Мета впровадження спеціальних інформаційних систем для аграріїв (Farm Management System, FMS) в управління агроекосистемами полягає в підвищенні ефективності та конкурентоспроможності аграрного виробництва. За допомогою ІСТ агрономи можуть оптимізувати вибір сортів, планування посіву, застосування добрив, засобів захисту рослин, збирання врожаю та інші аспекти агротехнологій, що все разом сприятиме покращенню якості продукції, зменшенню витрат, збереженню ресурсів та навколишнього середовища. Однак, на практиці в аграрних підприємствах використовується не повний функціонал FMS. Наприклад, в роботі [30] проаналізовано сотні публікацій, пов'язаних із описом функцій та використанням FMS. Статистичний аналіз показав, що більш популярними функціями залишається облік ресурсів та фінансів (наявний у 17 з 38 розглянутих FMS) у порівнянні з прогнозами урожайності, погодними сервісами, управління вирощуванням (7 із 38). Однак, саме контроль операцій на полі, застосування сучасних алгоритмів аналітики, прогнозування є запорукою отримання справжнього ефекту та системного цифрового управління.

План впровадження FMS в управлінні агросистемами має включати цілі, завдання, ресурси, етапи та очікувані результати використання сучасних технологій для підвищення ефективності та конкурентоспроможності аграрного сектору. Однак, зважаючи на великі розбіжності розмірів аграрних підприємств (від сотень до десятків тисяч га земельного банку), різні природні та інші умови, розпочати системне впровадження в практику сільськогосподарського виробництва новітніх наукових розробок галузі ІТ та мікропроцесорної техніки можна з окремих складових.

В табл. 1.1 наведено склад функціональних модулів інформаційної системи, які забезпечують автоматизацію ключових напрямків аграрного виробництва та управління ними.

Таблиця 1.1 – Ключові складові ефективного землеробства і методи автоматизації в середовищі FMS (узагальнено на основі [30])

Складова FMS	Метод автоматизації управління	Очікуваний результат від впровадження
Земельний банк: - поля - земельні ділянки - договори оренди	Автоматизація управління земельним банком - GIS - CRM - агродрони	- консолідація земель - зменшення ризиків втрати - підвищення капіталізації компанії
Технічно-матеріальні цінності: - посівний матеріал - добрива - засоби захисту рослин - паливо	Автоматизація обліку, робочого часу, списання: - мобільний агроном - автоматизація АЗС, вагових - GPS-моніторинг техніки та операцій	- зниження витрат - оперативне прийняття рішень - контроль активів
Техніка: - геометрія руху по полю - норми виконання операцій - моніторинг виконання операцій	Впровадження точного землеробства: - паралельне водіння - моніторинг обробітку, висіву, вилу - управління нормами проведення операцій	- ефективність операцій - контроль дотримання технології - підвищення EBITDA (показник, що дорівнює обсягу прибутку до погашення зобов'язань, сплати податків та амортизаційних відрахувань.)
Інформація - дані про земельний банк - дані по ґрунтам - метеодані - дані про виконані операції - дані про посіви та урожайність	Програмні продукти та сервіси: - супутниковий моніторинг - метеосервіси - системи точного землеробства - системи FarmManagement	- передача знань - єдине інформаційне поле - капіталізація компанії

Аналіз головних обмежуючих (уповільнюючих) факторів, з якими найчастіше стикаються при впровадженні цифрових технологій та систем в аграрному виробництві, проведено в багатьох наукових дослідженнях. До цих факторів відносять явища технічного характеру, зокрема: невідповідність поділу на зони управління (масиви полів); неготовність до обробки в єдиній системі великих обсягів даних, отриманих від численних датчиків та супутників, дронів тощо; несумісність окремих систем в обслуговуванні одного підприємства через різні стандарти [28], низький рівень якості забезпечення доступу до мережі інтернет у сільській місцевості. Особливу роль грає в цьому ж контексті готовність персоналу до інновацій та рівень знань. Дослідники багатьох країн

приділяють цьому фактору особливу увагу і вважають, що головною перешкодою є не технології, техніка, і навіть не фінанси. Основною перешкодою всюди у світі є культура організації та готовність персоналу. І це тим більше актуально для України [31].

Таким чином, виходячи з табл. 1.1, FMS повинні охоплювати всі виробничі й технологічні ланки завдяки включенню таких компонентів, як системи дистанційного моніторингу, прогнозування погоди, оптимізацію технологій вирощування рослин, управління водними ресурсами, аналіз даних та інше. Як правило, більшість головних функцій реалізовані в спеціальних модулях FMS з ідентичними назвами.

Обґрунтування набору модулів та функцій FMS як єдиної платформи управління потоками даних в управлінні виробничими процесами в галузі рослинництва було представлено в роботі [28]. Функціонал найбільш відомих комплексних рішень для агровиробників (FieldView™ від Bayer [32], Soft.Farm [33], Cropwise Operations від Syngenta [34]) мають схожий набір виробничих модулів. На рис. 1.4 показано фрагмент головної сторінки системи Soft.Farm, де представлено повний склад модулів системи.



Рисунок 1.4 – Набір головних модулів IC Soft.Farm у розділі «Рослинництво» [33]

Всі модулі можна об'єднати в такі основні групи: модулі обробки земельних даних та модулі обстеження полів на основі супутникових знімків і

планування, контролю робіт. В контексті виконання всіх функцій можна стверджувати, що найбільше оптимальними, економічними та географічно доступними (без прив'язки до робочого місця) є системи, що базуються на хмарових сервісах. Перевагою використання хмарних обчислень є можливість управляти витратами на програмне та технічне забезпечення й ефективно його використання, наприклад, для послуги Software as a Service (SaaS) – «програмне забезпечення як сервіс». Успішні хмарні рішення слід застосовувати як зміну або розширення традиційних програмних рішень для технічної та фундаментальної реорганізації бізнес-моделі. За їх допомогою можна зберегти надвеликі обсяги даних, доступ до яких здійснюється з мобільних та персональних комп'ютерів.

Архітектура сучасних ІС, заснованих на хмарних обчисленнях, є модернізованим варіантом більш відомої клієнт-серверної архітектури. Відомо, що хмарні обчислення – це програмно-апаратне забезпечення вебінтерфейсу чи віддаленого доступу. При цьому терміналом стає підключена до мережі робоча станція користувача, а сервери – обчислювальною хмарою [35].

Загалом, впровадження інформаційних систем в агрономії має враховувати специфіку регіону, потреби фермерів, наявність інфраструктури та фінансування, а також можливі ризики та виклики. Для розуміння складу технологій і вибору необхідного функціоналу ІС з метою автоматизації управління виробництвом у конкретному сільськогосподарському підприємстві необхідно провести значний обсяг підготовчих робіт. Структурований опис етапів впровадження і використання FMS показано в наступних розділах роботи. Водночас така високоспеціалізована платформа має містити добре спроектовану базу даних загального призначення, бути гнучкою, масштабованою та надавати користувачам достатньо зручний доступ [36]. Мова йде про високий рівень концентрації інжинірингових потужностей всередині компанії. При цьому більшість рішень базуються на прийнятих міжнародних стандартах.

Як додаткову перевагу, різні зацікавлені сторони такі як державні та законодавчі органи, переробна промисловість і приватне промислове виробництво підключіться до цієї інформаційної системи потоку даних для збору

та передачі інформації, зможуть надавати технічну підтримку для фермерів [37]. В аграрному секторі це актуально та дозволяє досягти наступних технічних та системних переваг.

1. Високий рівень сумісності різнорідних програмно-апаратних засобів, які можуть бути різними в пристроях та машинах від різних виробників, що є фактом у більшості аграрних підприємств.

2. Підсилені можливості наступної інтеграції окремих різних підсистем в єдину систему керування окремим підприємством, а також зменшення витрат в межах великого об'єднання (холдингу).

Наприклад, за такою ідеологією діють передові промислові холдинги, в яких прийняті корпоративні політики щодо інтеграції АСУТП-MES-ERP, які базуються на стандартах ISA-88(IEC 61512) та ISA-95 (IEC62264) [38]. Застосування цих підходів дозволило значно оптимізувати витрати на процес інжинірингу. Використання таких стандартів має значний вплив на покращення простежуваності у виробництві, що для виробників агропродукції є особливо актуальним у контексті розширення експортної політики України в країни ЄС. Перспектива на майбутнє – побудова агропідприємств на комплексі технологій Агроіндустрії 4.0 з обробкою даних на єдиних платформах.

Висновки до розділу 1

На сьогодні галузі сільськогосподарського виробництва розглядаються як комплексні агропродовольчі системи, що включають взаємодії між людьми, технологіями та природними ресурсами, які забезпечують виробництво, переробку, транспортування, зберігання та споживання продуктів харчування і мають перетворитися в стійкі продовольчі системи.

Агрокультура 4.0 обговорюється на світових майданчиках і форумах. Майбутнє сільське господарство масово буде використовувати складні технології Агрокультури 4.0, такі як роботи, датчики температури, хімічного складу та

вологості, аерофотознімки та технології систем глобального позиціонування GPS. Ці передові пристрої та точне землеробство, точне тваринництво і роботизовані системи дозволяють фермам бути більш прибутковими, ефективними, безпечними та екологічно чистими. Світові лідери у сфері цифрових послуг і консалтингу нового покоління пропонують цифрові технології як інноваційні рішення для підвищення продуктивності сільського господарства, пом'якшуючи пов'язані з цим ризики. Технології можуть допомогти збалансувати продуктивність, зайнятість і стійкість.

В конвергенції цифрового та фізичного світів у сільському господарстві спостерігається інтеграція інформаційних технологій та операційних технологій в Індустрію 4.0, що називається інтеграцією ІТ-ОТ.

Одним із підходів до підвищення доступності є розробка технологій із використанням програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, архітектур, фреймворків і стандартизованих інтерфейсів прикладного програмування (API). Інтегровані платформи приймають дані, використовують робочий процес і забезпечують поєднання каналів даних із механізмами прийняття рішень на основі штучного інтелекту. Крім того, архітектури повинні використовувати сильні принципи модульного та гнучкого програмного забезпечення, мікросервісів і непатентованих програмно-незалежних моделей.

Подальшими завданнями в роботі є вибір ефективних методик обробки рядів великих даних в агросистемах, проведення аналітики прогнозних показників, прогнозування кліматичних даних та їх вплив на урожайність, а також цифровий моніторинг важливих показників у рослинництві з подальшою обробкою в інформаційній управляючій системі типу FMS, на платформі якої можливо проводити обробку всіх видів зібраних даних.

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ АГРОТЕХНІЧНИХ ДАНИХ МЕТОДАМИ ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ ТА НА ОСНОВІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

2.1 Особливості роботи з масивами даних в агроекосистемах при впровадженні інформаційних систем у виробничу діяльність агропідприємств

Для реалізації поставлених завдань кваліфікаційної роботи необхідно розглянути основні типи даних, які збираються і обробляються протягом виробничих циклів різної тривалості при вирощуванні агрокультур в агропідприємствах будь-якого типу, розміру. Надалі необхідно обрати методології раціональної обробки таких даних, використовуючи відповідні програмні комплекси. Іншими словами, необхідно чітко розуміти сутність і взаємозв'язок технологічних операцій, наприклад у галузі рослинництва, категорії оброблюваної інформації, а також перелік і форму вхідних і звітних документів, які створюються і обробляються в усіх обліково-технологічних процесах.

Точне землеробство є ключовим напрямом у цифровій трансформації сільського господарства, дозволяє оптимізувати агротехнічні процеси, витрати ресурсів і підвищити врожайність. Центральними технологіями точного землеробства є моніторинг, прогнозування, агроскаутінг. Саме вони формують основу для прийняття рішень, що ґрунтуються на даних, а не на інтуїції.

Сучасні технології вирощування сільськогосподарських культур, які характеризуються як ресурсоощадні та ґрунтозахисні, є частинами так званої індустріальної технології. Сутність полягає в тому, що за увесь період від висіву до збирання урожаю біологи, агротехніки та інші фахівці з біологічної науки ведуть спостереження за розвитком рослин, аналізують і за виявлення ознак порушення їх розвитку (вплив шкідників, захворювань і т. ін.) обробляють

посіви широкозахватними агрегатами і вносять відкориговані дози добрив, гербіцидів або ЗЗР. При цьому дані про виконані роботи чітко фіксуються [39]. Ключовими показниками ефективності АС є урожайність і рентабельність.

У подальшому дослідження робить фокус на таких показниках, як урожайність, кліматичні фактори та методи збору даних, а також на автоматизації управління й аналітики створеної бази даних. Урожайність сільськогосподарських культур є інтегрованим параметром, який визначається густотою стояння рослин у посіві та їх середньою продуктивністю. Значення останнього параметра залежить як від генетичних особливостей рослин, так і від рівня наявності та доступності низки факторів середовища, насамперед води, тепла, елементів мінерального та повітряного живлення. Облік таких факторів ведеться по відношенню до різних земельних ділянок (полів) господарства.

До основних факторів впливу на реалізацію потенціалу рослини відносять: погода, ґрунти, вибір насіння, вибір техніки, підготовка ґрунту, сівба, розподіл води, управління поживними речовинами, спостереження у період вегетації, боротьба зі шкідниками, хворобами, бур'янами, збирання. Необхідними елементами точного землеробства при цьому виступають: карти, віддалений моніторинг, технологічні рішення, погодні станції, моделювання ризиків, фінансові рішення, управлінські рішення. На всіх етапах вирощування доцільно застосовувати широкий спектр сучасних інформаційних технологій від точного землеробства до Агрокультури 4.0.

Сучасні досягнення в області телекомунікацій, цифрових технологій, методів збору й оброблення інформації об'єктивно сприяють створенню принципово нових програмних комплексів, які здатні інтегрувати досвід багатьох спеціалістів в області агрономії, біології, економіки та інших суміжних областях діяльності [40]. Мета впровадження ІС в агрономії полягає в підвищенні продуктивності агроecosystem та підтримці методів точного землеробства. Інформаційні технології дозволяють збирати, обробляти, аналізувати та передавати дані про стан ґрунту, рослин, клімату, ринку та інші фактори, що впливають на агрономічні процеси. За допомогою ІСТ агрономи

можуть оптимізувати вибір сортів, планування посіву, застосування добрив, ЗЗР та інші аспекти агротехнологій, що все разом сприятиме покращенню якості продукції, зменшенню витрат, ресурсів та навколишнього середовища.

Процес впровадження та використання FMS починається зі створення баз даних і, перш за все, збору інформації про поле. Для збору інформації використовуються дистанційні методи зондування, зокрема аерофотозйомка, супутникові знімки, збиральна техніка, обладнана системою моніторингу урожайності, автоматичні ґрунтові пробовідбірники спільно з GPS-приймачами.

Дані, як правило, формуються в списки. Більшість систем передбачає їхнє зв'язування з іншими операціями, доповнення, зміну й редагування. Опис основних блоків даних, які формують відношення баз даних кожної системи представлено в переліку.

1. Розробка бази даних, збір інформації про поле. Для збору інформації використовуються дистанційні методи зондування: супутникові знімки, аерофотозйомка, збиральна техніка, обладнана системою моніторингу урожайності, автоматичні ґрунтові пробовідбірники спільно з GPS-приймачами. Дані збираються за відповідними методиками і вносяться до тематичних словників. Для заповнення відомостей про площу полів, ділянок необхідно: провести інвентаризацію полів, виділити фактичні розміри площі полів, їх межі, а потім на основі отриманих даних скласти електронну карту.

2. Відомості про урожайність включають складання карти врожайності і вологості зерна. На цій карті різними кольорами виділяють зони з різною продуктивністю. Збирання проводять комбайнами, обладнаними системами моніторингу врожайності, які складаються з GPS-приймача, бортової інформаційної системи, датчиків вологості і маси зерна, а також програми картографування. Дані про стан записуються разом з даними від датчиків через визначений проміжок часу.

3. Створення та використання зон продуктивності на полі. Зона продуктивності – зона на полі із значними відмінностями по типу ґрунту, водопроникною здатністю та/чи історією, а також відомості про агрохімічні і

агрофізичні властивості ґрунту і рівні розвитку рослин. Найкращі результати по формуванню зон продуктивності були отримані на полях із різними типами ґрунтів, особливостями рельєфу та дренажу. Для виділення зон продуктивності використовуються змінні:

- характеристики ґрунту;
- ЄКО (>3-4 пункти);
- вміст гумусу (>0.5%);
- зміна висот на полі;
- продуктивність (>10%).

Джерелами даних для формування зон продуктивності на полі в середовищі FMS виступають:

- дані дистанційного моніторингу (БПЛА/супутник), на основі яких розраховується індекс вегетації рослин (NDVI), будується карта вегетації;
- карта неоднорідності (електропровідність ґрунту);
- дані рельєфу;
- карти врожайності, побудовані на основі системи моніторингу врожайності. Опрацьовані карти врожайності за багато років;
- результати аналізу ґрунту.

Управління кожною зоною продуктивності на полі може відрізнитись залежно від запланованої врожайності та рентабельності виробництва. Інформація про зони продуктивності на полі використовується для розрахунку норми висіву, дози внесення добрив, систем захисту рослин, визначення рівня прибутковості. Спроби повної автоматизації визначення зон продуктивності є недосконалими, якщо система управління та ПЗ на первинному обладнанні несумісні. Саме тому великі холдинги практикують створювати платформи в розрізі поставок добрив, техніки, насіння (наприклад, Bayer, Syngenta та інші). Інші програмні рішення враховують подібні фактори, створюючи гнучкі системи з відповідними API, наприклад Soft.Farm. Для невеликих господарств доцільним є використання стандартних програм обробки даних (зокрема, Excel) та моделювання за допомогою вбудованих функцій та пакетів аналізу даних.

4. Електронні карти полів. Для роботи з багатошаровими електронними картами існують спеціальні пакети комп'ютерних програм на базі геоінформаційних систем. Інтерактивні електронні карти, які є вбудованим інструментом в FMS (наприклад, Soft.Farm [33]), дозволяють створити і використовувати такі види шарів: вегетації; неоднорідності; скаутінгу; NDVI; вологості зерна; обробки полів; перекриття; внесення; зон ефективності; прибутку; витрат; урожайності; висоти; продуктивності; палива; виробітку.

5. Погодні умови. Використання метеостанції з високотехнологічними цифровими інструментами прогнозування о тенденціях зміни погодних умов в регіоні, для планування польових робіт.

У підсумку зрозуміло, що сучасне сільське господарство пов'язане з отриманням і обробкою великої кількості внутрігосподарської інформації, яка значно впливає на якість прийняття рішень. Протягом року виробник приймає не менше 50 ключових рішень. Кожне прийняте рішення впливає на наступне і, в кінцевому підсумку, на врожай. Це той момент, коли роль даних особливо цінна для процесу виробництва. Рішення повинно бути засноване на фактах, а не на припущеннях, і прийматися на основі аналізу даних виробництва. Кожне рішення – це результат аналізу достовірних і коректно інтегрованих даних.

2.2 Застосування інструментарію лінійного програмування при оптимізаційному моделюванні показників аграрного виробництва

На основі ведення даних можливо управляти не лише операційною та плановою діяльністю в аграрних підприємствах. Вищим рівнем ефективності використання ІСТ є моделювання продуктивності АС та прогнозування, наприклад, урожайності. Через складність аграрного сектору фермери часто стикаються з труднощами при прийнятті правильних рішень щодо того, що вирощувати, в який сезон і як ефективно використовувати наявні ресурси. Ключовим викликом є вибір найкращого варіанта серед кількох можливих.

За даними опитування провідних фахівців аграрних підприємств, які використовують FMS протягом більше 10 років, підтверджено, що математичне моделювання вирощування культур в онлайн-системах планування може включати в себе різні аспекти, які допомагають визначати оптимальні стратегії вирощування та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Напрямки ефективності таких моделей представлені в табл. 2.1.

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

Область моделювання в аграрному виробництві	Цільові показники моделювання та фактори впливу
Фізіологічні моделі росту рослин	<ul style="list-style-type: none"> – Врахування різних фаз розвитку рослин, таких як зростання, цвітіння та плодоношення – Моделювання впливу різних факторів, таких як кліматичні умови та водні ресурси, на фізіологічні процеси росту рослин
Агротехнічні моделі	<ul style="list-style-type: none"> – Визначення впливу різних методів обробки ґрунту, поливу та внесення добрив на вирощування культур – Моделювання оптимальних термінів та методів застосування агротехнічних прийомів
Метеорологічні моделі	<ul style="list-style-type: none"> – Використання даних про погоду для прогнозування росту та розвитку рослин. – Моделювання впливу погодних умов на фенологічні процеси культур
Оптимізація вирощування	<ul style="list-style-type: none"> – Врахування різних параметрів, таких як вибір сортів, густина посадки, розміщення рядків та інші для оптимізації вирощування – Математичне моделювання для знаходження оптимальних стратегій вирощування з урахуванням різних обмежень
Моделі прогнозування врожайності	<ul style="list-style-type: none"> – Використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування врожайності на основі історичних даних та поточних обмірів – Моделі для визначення факторів, що можуть впливати на різницю врожайності між різними сезонами
Просторові та геоінформаційні моделі	<ul style="list-style-type: none"> – Використання ГІС для моделювання просторового розподілу культур, враховуючи різні характеристики ґрунту та ландшафту – Моделювання впливу географічних факторів на вирощування.
Моделі витрат ресурсів	<ul style="list-style-type: none"> – Математичне моделювання витрат води, добрив та енергії під час вирощування культур – Визначення економічно ефективних стратегій з урахуванням витрат ресурсів

Отже, прийняття рішень щодо оптимального вибору виробничих дій є центральною проблемою сучасного землеробства. Використання низки

математичних моделей в онлайн-системах планування дозволяє фермерам та агрономам більш точно прогнозувати, планувати та оптимізувати процеси вирощування культур для підвищення продуктивності агроценозу.

Кількісні методи, зокрема лінійне програмування (Linear Programming, LP), мають значний вплив на розв'язання більшості проблем, з якими стикаються фермери в епоху Agriculture 4.0. Лінійне програмування було розроблено, щоб допомагати фермерам у плануванні, прийнятті рішень, підвищенні ефективності виробництва та раціональному розподілі ресурсів. Фермер має ефективно керувати наявними ресурсами господарства, такими як робоча сила, добрива, насіння, енергія тощо, з метою максимізації прибутку.

Попередні дослідження, що застосовували методи LP, переслідували різні цілі. Наприклад, у [41] фермери за допомогою LP змогли максимізувати прибутки шляхом вибору найкращої культури у відповідний сезон та оптимізації розподілу земельних і водних ресурсів для кожної з них. У [42] було здійснено спробу підвищити прибутковість господарств, визначивши оптимальне поєднання культур для вирощування з урахуванням таких обмежень, як загальна площа, площа міжрядних посівів та обсяг інвестицій.

Таким чином, максимізація виробництва не завжди гарантує максимізацію прибутку. Це свідчить про те, що методи лінійного програмування відіграють важливу роль в оптимізації виробничого планування культур з урахуванням обмежень, установлених фермерами.

Модель лінійного програмування – це метод, який досліджує максимум або мінімум лінійної цільової функції за наявності низки обмежень, щоб знайти оптимальне розв'язання.

Сьогодні ця модель широко використовується у фінансових, маркетингових, виробничих і сільськогосподарських задачах:

- у фінансовій сфері LP застосовується для визначення оптимального бюджету капіталу, розподілу активів, фінансового планування тощо;
- у виробництві – для визначення оптимальної структури продукції, планування виробництва й розкладу робіт;

– у сільському господарстві модель використовується для оптимізації структури посівів і розподілу ресурсів (води, землі, добрив тощо).

Лінійне програмування не є новим поняттям: його було розроблено до Другої світової війни радянським математиком А. М. Колмогоровим [43]. У 1945 році Стіглер уперше застосував LP для розв'язання задач, відомих сьогодні як «дієтичні задачі». Завдяки подальшому розвитку цієї галузі запропоновано використати LP для визначення найдешевших комбінацій кормів і раціонів для тваринництва. До інших практичних задач, які можуть бути сформульовані як задачі лінійного програмування, належать:

- оптимізація кормових сумішей (feed mix problem);
- планування сівозміни (crop rotation plan);
- розподіл водних і земельних ресурсів;
- переробка сільськогосподарської продукції;
- визначення оптимальної кількості добрив тощо.

Такі задачі ефективно розв'язуються за допомогою LP-моделі, що підкреслює її важливість для аграрної галузі. Модель використовується для визначення оптимального рішення під час вибору або комбінування сільськогосподарських проєктів з метою максимізації прибутку або зниження витрат у межах наявних ресурсів. Існує три основні причини використання моделі LP для розв'язання більшості проблем у сільському господарстві:

1. Підвищення прибутковості дрібних фермерських господарств, допомога у виконанні вимог щодо виробництва продовольчих культур та стимулювання раціонального використання природних ресурсів [44].

2. Оптимізація прибутку – для перевірки, чи зростає дохід після впровадження моделі [45].

3. Застосування різновидів LP-моделей, таких як нечітке цільове програмування (fuzzy goal programming), що допомагає розв'язувати задачі в умовах невизначеності, які впливають на прийняття рішень [46].

Метод лінійного програмування вважається найпоширенішим інструментом операційних досліджень, коли цільова функція та всі обмеження є

лінійними. Він складається з трьох основних компонентів:

- змінні рішення (decision variables), що визначають цільову функцію;
- цільова функція – вираз для максимізації або мінімізації показника;
- обмеження, яких має дотримуватися розв'язок.

Цільова функція є математичним виразом, який поєднує змінні рішення та їхні коефіцієнти для досягнення оптимального результату. Результат задачі LP визначається максимальним або мінімальним значенням лінійного рівняння f :

$$f = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

Обмеження представляють межі моделі, пов'язані з доступними ресурсами. Їх можна задавати у вигляді рівнянь (=) або нерівностей (\geq або \leq), але виникають труднощі з неоднозначними задачами, коли використовуються строгі нерівності ($>$ або $<$) [47]. Крім того, додаються умови невід'ємності

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

оскільки від'ємні значення фізичних величин є нереальними. Це означає, що ми завжди працюємо в першому (північно-східному) квадранті координатної площини (рис. 2.1).

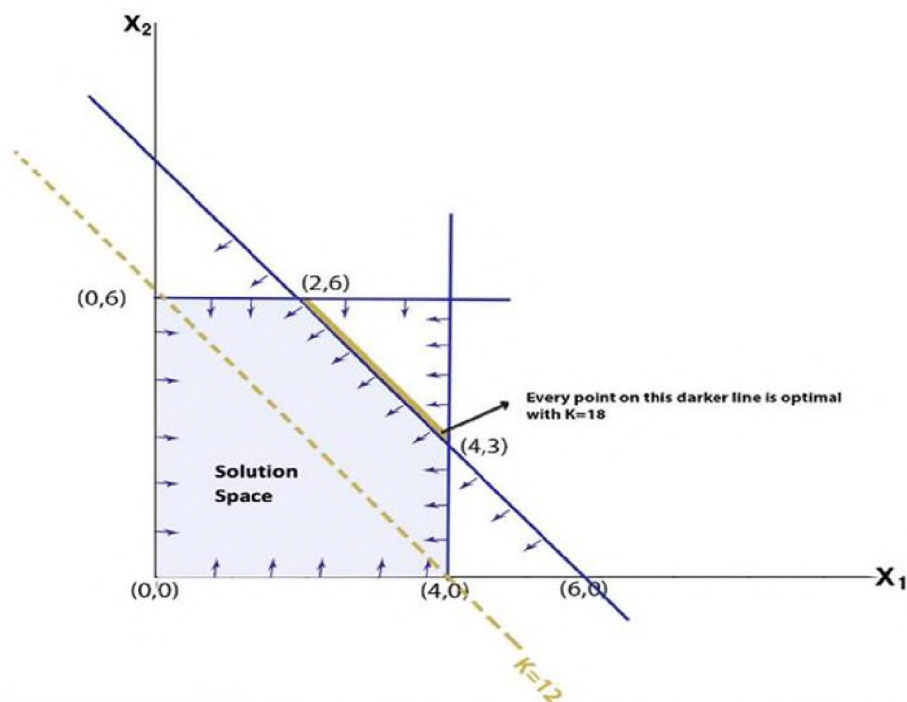


Рисунок 2.1 – Розрахунок оптимального розв'язку методом лінійного програмування

Розв'язок визначається для системи лінійних нерівностей, тобто знаходяться такі значення змінних x_i , які одночасно задовольняють усі обмеження. Потім ці значення підставляються у цільову функцію f , щоб знайти кутову точку (corner point) – місце перетину двох ліній. Усі кутові точки належать до області допустимих рішень (solution space), тобто заштрихованої області, що задовольняє всі обмеження та вказує на всі можливі оптимальні рішення (див. рис. 2.1).

Наприклад, на рис. 2.1 множина допустимих розв'язків позначена синіми лініями x_i , тоді як жовта лінія представляє цільову функцію, що досягає максимального значення K у куті області рішень. Усі точки на темно-жовтій лінії є потенційними оптимальними розв'язками, оскільки забезпечують найвищу цільову функцію.

Джордж Д. Данціг (George D. Dantzig) запропонував підхід для розв'язання задач лінійного програмування в межах своїх досліджень, розробивши симплекс-алгоритм для практичних застосувань. Цей алгоритм є класичним методом пошуку максимального або мінімального значення функції за наявності системи обмежень.

Отримання початкового допустимого розв'язку часто є складним для LP-моделей із обмеженнями типу « \geq » або « $=$ », оскільки вони не мають початкової здійсненності. У таких випадках LP поєднують з іншими підходами до оптимізації аграрних задач, наприклад:

- багатоцільове програмування (Multi-Goal Programming, MGP);
- цільове програмування (Goal Programming, GP);
- багатооб'єктивне програмування (Multi-Objective Programming, MOP);
- зважене цільове програмування (Weighted Goal Programming, WGP).

Також нечітке цільове програмування (Fuzzy Goal Programming, FGP) дозволяє працювати з даними, які мають нечіткі цілі й обмеження.

Модель лінійного програмування (LP) складається з різних інструментів, які є ключовими для оптимізації таких моделей. Серед найбільш відомих програмних засобів можна назвати LINDO, LINGO та TORA. Нижче подано

огляд найпопулярніших програм, що використовуються для пошуку оптимальних рішень у задачах лінійного програмування.

1. Microsoft Excel є потужним інструментом для кількісного аналізу. У ньому передбачено зручну функцію «Пошук рішення» (Solver), що дозволяє знаходити допустимі та оптимальні рішення задач. Кроки з підключення надбудови Solver у середовищі MS Excel та порядок її використання детально описані, наприклад, в роботі [43].

Функція Solver часто розглядається як метод «what-if» аналізу [48]. Багато дослідників застосовують MS Excel для швидкого та простого розв'язання задач оптимізації. Наприклад, у [48] запропоновано модель для контролю невизначеності сільськогосподарських доходів за допомогою моделі нечіткого багатокритеріального лінійного програмування (Fuzzy Multi-Objective Linear Programming, FMOLP), яку успішно реалізовано через інструмент Solver у Excel.

2. AMPL (A Mathematical Programming Language) – це мова математичного програмування, призначена для ефективного розв'язання оптимізаційних моделей, що містять велику кількість змінних і обмежень [49].

Інші дослідження, наприклад [50], використовували AMPL для розв'язання задачі доставки овочів до місця продажу у короткий термін. Інші за допомогою AMPL разом із системою MINOS вирішували проблему виробництва та дистрибуції сільськогосподарської продукції [51].

Існують також інші інструменти для розв'язання задач LP. Наприклад, у [52] застосовано Python 2.7 разом із середовищем розробки PyCharm для створення аналітичної програми, яка допомагає максимізувати прибуток фермерського господарства залежно від прийнятих рішень під час сезону посіву.

Деякі дослідники [51, 52] оцінили свої результати за допомогою програмного забезпечення LINGO, головною перевагою якого є здатність формувати та аналізувати великі задачі [49].

Отже, усі зазначені інструменти дозволяють швидко та ефективно формувати рівняння і знаходити розв'язки задач лінійного програмування. Використання цих засобів у поєднанні з LP-моделями є надзвичайно важливим

для розв'язання оптимізаційних задач та пошуку найкращих рішень, що, у свою чергу, сприяє підвищенню якості управлінських рішень у сільському господарстві. Загалом існує широкий спектр застосувань лінійного програмування в аграрній сфері. На рис. 2.2 наведено основні напрямки його використання в сільському господарстві.

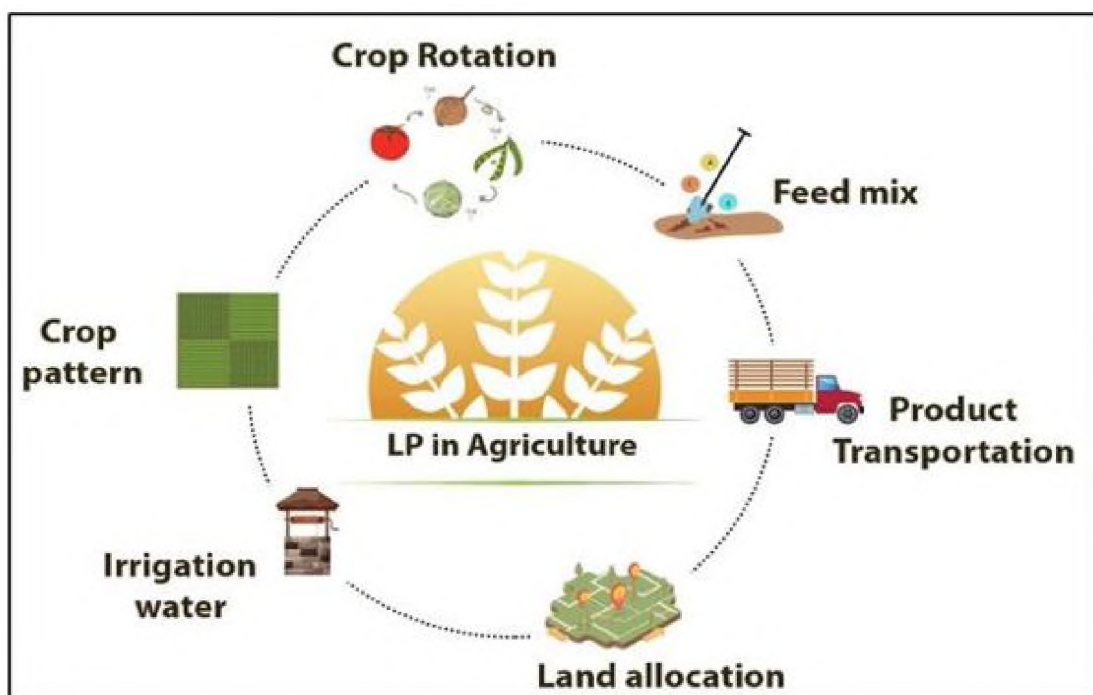


Рисунок 2.2 – Застосування лінійного програмування в сільському господарстві

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

2.3 Застосування алгоритмів лінійного програмування при вирішенні оптимізаційних задач в аграрному виробництві та в середовищах FMS

2.3.1 Розв'язання типових задач в рослинництві методами LP

Ключовими завданнями аграрних підприємств при вирощуванні продукції рослинництва є планування посівів культур, сівозмін, визначення оптимальної структури посівних площ з метою отримання максимального прибутку.

Лінійне програмування як цифровий інструмент допомагає визначити оптимальну структуру посівних площ і розробити план виробництва продовольчих культур, що забезпечує максимізацію прибутку фермерських господарств. Розглянемо результати успішних кейсів на основі застосування LP.

У роботі [53] було використано інструмент LP для визначення оптимального поєднання культур за двома підходами:

- поєднання земельних площ, зайнятих горохом, пшеницею та тваринництвом;
- поєднання площ під гірчицею, нутом, пшеницею та свинарством.

Результати показали зростання прибутковості на 68% у господарстві 1 та на 16,5% у господарстві 2, що свідчить про позитивний вплив застосування LP на економічні показники. Дослідники також зазначили, що наявність тваринництва знижує виробничі витрати завдяки використанню природних добрив і покращенню родючості ґрунту.

Система змішаних посівів (crop mix) – це один із варіантів вирощування, який передбачає одночасне культивування кількох культур у тому самому сезоні [54]. Це одне з ключових питань для фермерів, які постійно вирішують, які культури висівати, коли та в якій кількості. У роботі [54] запропоновано модель на основі LP, яка максимізує загальний дохід за наявності певних обмежень – площі орних земель, доступних ресурсів і фіксованого бюджету.

План ротації культур, або сівозміна, є необхідним елементом прийняття рішень в управлінні вирощуванням продукції рослинництва. Сівозміна – це система, за якої різні культури висаджуються на одній і тій самій земельній ділянці протягом певного періоду [55]. На план сівозміни можуть впливати численні обмеження, зокрема погодні умови та ринкова кон'юнктура. Ці чинники визначають сезонність вирощування культур і, відповідно, впливають на продуктивність господарства. Модель лінійного програмування дає змогу визначити оптимальний план ротації культур для досягнення найкращого результату. Крім того, застосування LP сприяє підвищенню рівня продуктивності, доходів і ефективному використанню наявних ресурсів.

Так, у дослідженні [56] LP було використано для досягнення найвищого рівня продуктивності на одній із ферм у Багдаді завдяки раціональному використанню наявного капіталу та впровадженню сівозміни для підтримання родючості ґрунту. Автор порівняв дохід, отриманий за фактичним аграрним планом (на основі даних 2015–2016 рр.), із результатом, отриманим за допомогою LP. Було встановлено, що чистий дохід зріс із 4 837 145 у. о. до 7 930 167,2 у. о., тобто на 3 093 023 у. о. або в 1,64 рази більше за умови використання менших ресурсів. Таким чином, оптимальний план забезпечив значно вищий прибуток при обмежених ресурсах.

У деяких випадках, особливо коли ферма має кілька цілей, одного лише LP недостатньо для підвищення прибутку, тому поєднання LP із зваженим цільовим програмуванням (WGP) дає кращі результати. Кілька дослідників розробили моделі на основі поєднання LP та WGP, що забезпечували вищий середній дохід і нижчі витрати для ротації культур [55-56]. Модель ураховувала такі ключові параметри: стратегію висіву культур, потребу в додаткових ресурсах (праця, техніка, добрива тощо), кількість культур і економію добрив під час ротації. Комбінація методів продемонструвала надійні результати, довівши, що LP у поєднанні з WGP дає змогу оптимізувати сівозміну й підвищити доходи фермерів.

Сівозміна є особливо важливою у органічному землеробстві, оскільки сприяє збереженню родючості ґрунтів без використання хімічних добрив і пестицидів. У [57] було розроблено модель на основі змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP) для планування чотирирічної сівозміни з урахуванням таких обмежень, як режим зрошення, урожайність культур тощо, щоб задовольнити попит ринку. Менеджери господарств високо оцінили цю модель, оскільки вона забезпечила виконання ринкових вимог і не порушила жодних агротехнічних правил протягом усього циклу ротації.

Розподіл земель – це процес поділу сільськогосподарських площ між різними видами культур з метою підвищення загального прибутку господарства. Такий підхід також допомагає визначити, яка продукція є більш прибутковою, і

як саме розподіл площ може вплинути на зростання доходів. LP широко застосовується для оптимізації розподілу земель під різні культури.

Зокрема, у [58] було використано симплекс-метод для визначення оптимального розподілу земель між культурами – пшеницею, рисом, бобовими, кукурудзою та іншими. Спочатку під посів було відведено 24,09 га, а після моделювання площу було збільшено до 27,53 га, що призвело до зростання прибутку.

Приклад використання LP-моделі для оптимального розподілу площ під 10 основних культур у межах досліджуваної території описано в [59]. Для розв'язання задачі застосовано алгоритми симплексу та Push-Pull, а результати порівняно за кількістю ітерацій, необхідних для знаходження оптимального рішення. Виявлено, що алгоритм Push-Pull вимагав 20 ітерацій, тоді як симплекс-алгоритм – лише 11. У результаті було визначено оптимальну схему розподілу земельних площ: бавовна - 21,49 %; бобові – 13,47 %; чорний грам – 5,45 %; джовар – 14,8 %; соєві боби – 18,08 %; соняшник – 0,8 %; сафлор - 6,7 %; нут – 39,5 %; зелений грам – 15,97 %; пшениця – 0 %. За такого розподілу прибуток становив максимальне значення, а витрати на насіння – мінімальне.

У більшості задач сільськогосподарського планування існують невизначені параметри, які важко точно сформулювати у вигляді обмежень. Для цього доцільно застосовувати нечітке програмування (fuzzy concept). Наприклад, у [60] використано fuzzy goal programming (FGP) для визначення найкращого розподілу оброблюваних земель. Метод цільового програмування було обрано тому, що традиційне LP не дозволяє врахувати кілька цілей одночасно – таких як прибуток, водопостачання та трудові ресурси. Усі ці вимоги були описані у вигляді нечітких змінних. Результати показали, що виробництво культур, чистий дохід, трудові та водні ресурси були задоволені з високим рівнем точності, що підтвердило ефективність підходу для розподілу земель під різні культури.

З огляду численних прикладів можна дійти висновку, що методи лінійного програмування є доволі ефективними при розв'язанні одноцільових задач з чіткою системою обмежень.

Однак, більш складні задачі, з багатоперіодними підходами, множинними цілями, вимагають більш складних розв'язань. У дослідженні [61] було розроблено план розподілу зрошувальної води та оптимальний план посівів для підвищення чистого доходу та водної продуктивності (WP). Встановлено, що проста лінійна оптимізація за критерієм максимізації прибутку призводить до найнижчої WP. Для вдосконалення результатів використано метод створення множини альтернатив (Modeling to Generate Alternatives, MGA), що дозволило покращити результати LP-моделі. У порівнянні методів генетичного алгоритму, лінійного та цілочисельного програмування найвища водна продуктивність була досягнута при дефіциті води 30–35% і девіації 10% у межах MGA.

Іншим інструментом математичного програмування, що використовується для оцінки водних ресурсів, є багатооб'єктивне дробове цільове програмування (Multi-Objective Fractional Goal Programming, MOFGP) та нечітке цільове програмування (Fuzzy Goal Programming, FGP).

Так, у [62] застосовано модель багатооб'єктивного лінійного програмування з дробовим програмуванням (FP) для оцінки сталості використання водних ресурсів на основі двох показників:

- «чистий дохід/використання води»;
- «праця/використання води».

Ці моделі оптимізували використання води та структуру посівів у сільських господарствах. Результати показали, що FP-моделі краще оцінюють показники сталого розвитку, ніж класичні LP-моделі.

Поєднання LP і WGP дозволяє одночасно мінімізувати або максимізувати цільові показники та задовольняти підцілі LP-моделі. Цей підхід довів свою ефективність [55], [56]. Крім того, FGP може працювати з нечіткими цілями та обмеженнями, що робить його придатним для умов невизначеності.

Усі розглянуті застосування LP демонструють можливість визначення оптимального допустимого рішення в заданих умовах.

2.3.2 Реалізація алгоритмів лінійного програмування в спеціалізованих інформаційних системах управління аграрним виробництвом

Як було показано, результативність та ефективність методів лінійного програмування базується на платформі значної кількості експериментальних досліджень. На шляху від теорії до практики і масового застосування неможливо не підкреслити роль сучасних інформаційних систем підтримки прийняття рішень в аграрному секторі – FMS.

Для агропідприємств, які стали на шлях впровадження точного землеробства і поступового переходу на рівень Агрокультури 4.0, пріоритетним питанням є організація управління всіма виробничими процесами в середовищі спеціалізованої ІС та можливість поєднання на інтегрованій платформі потоків даних і формування більшості видів розрахунків. Модульна структура більшості систем, яка включає всі блоки виробничих процесів, необхідні довідники та інтерфейс користувача, дозволили акумулювати значні обсяги даних та запровадити найбільш популярні алгоритми оптимізації в інструментарій агронома.

Комплексний аналіз кількох найбільш популярних в Україні систем (MASTER: Агрономія IT-Enterprise [63], Cropwise Operations [34] та ін.) показав, що характеристики головних модулів співпадають та включають:

- модуль стану посівів: оцінка стану посівів – супутникові знімки високої та середньої роздільної здатності; історія полів; карти вегетації; карти рельєфу та схилів; точний прогноз погоди; опади; вологість ґрунту; температура повітря та ґрунту; активні температури; звіти оглядів полів; прогноз урожайності; повідомлення про опади та різке зниження вегетації;
- функції модуля агрооперації: планування агроробіт; норм внесення насіння, добрив, засобів захисту рослин; відбір проб ґрунту; тести ґрунту; карти аналізу текстури ґрунту; диференційоване внесення та ін.

Легкість початку роботи, статистика відгуків користувачів сприяли вибору серед всіх потужних розробок універсальної ІС Soft.Farm [33].

Система базується на хмарних технологіях, призначена для організації та управління сільськогосподарськими роботами, базові модулі надаються у вільному доступі. Словники IC Soft.Farm базуються на таких компонентах аграрного виробництва, як ґрунти, пестициди, види шкідників, засобів захисту рослин, марок техніки тощо; формування звітних електронних документів здійснюється відповідно до переліку та вимог чинного законодавства. Вхід в систему для початку роботи здійснюється безпосередньо через вебінтерфейс системи, використання починається після реєстрації.

Модульність побудови IC Soft.Farm дозволяє обліковувати всі технологічні операції, які проводяться, здійснювати аналітику, генерувати звітні документи, розраховувати зміст, обсяги і вартість робіт, використовуючи алгоритми обчислень, у тому числі й лінійного програмування. Розглянемо на прикладах підтримку прийняття рішень при плануванні посівів, дотриманні сівозмін і т. ін.

На початку застосування IC Soft.Farm, необхідно продовжити її налаштування та здійснити внесення вихідних даних у спеціальні довідники, що будуть у подальшому застосовані при виконанні більшості технологічних операцій на підприємстві. У довідники «Відділення», «Поля» та «Схеми сівозміни» розділу «Довідники» вносять дані, що стосуються підприємства, у якому впроваджується дана система. Приклад наведено на рис. 2.3.

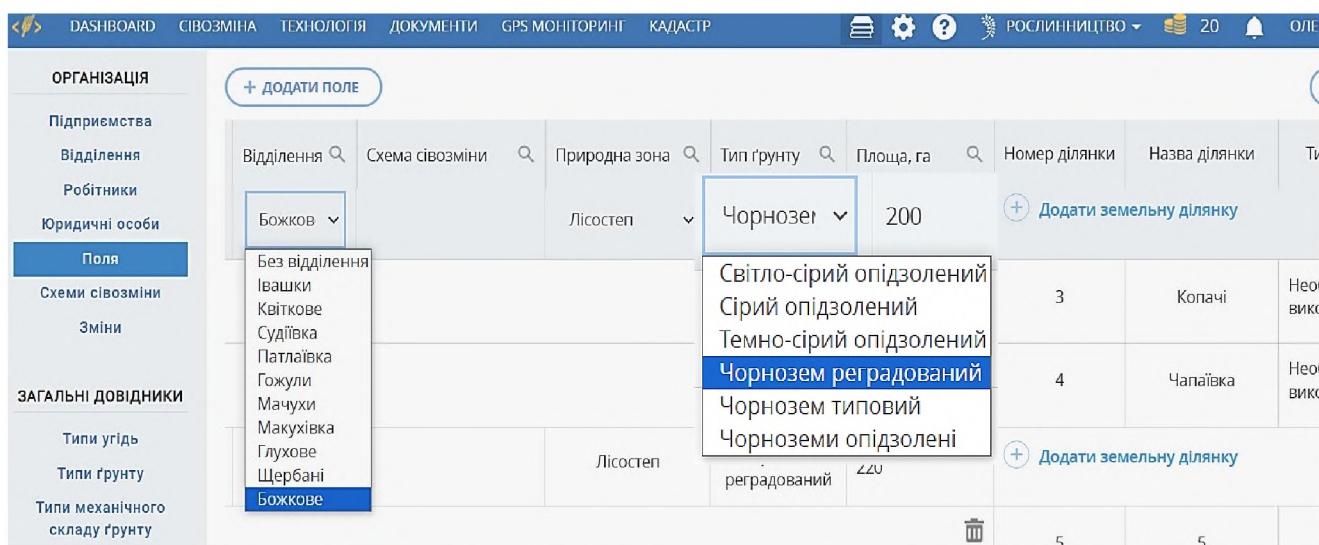


Рисунок 2.3 – Приклад процесу заповнення даних про всі поля господарства

Довідник «Поля» є одним із ключових для подальшої роботи, заповнюється після уведення даних про відділення, а також на основі довідників «Природна зона», «Типи ґрунту», «Тип угідь» (див. рис. 2.3) разом із первинними даними (площа, номер, тип ділянки). При цьому довідникові дані взаємопов'язані між собою певними відношеннями. Наприклад, при виборі природної зони розміщення земельних угідь автоматично формується список вибору типів ґрунтів, характерних саме для цієї зони (див. рис. 2.3).

Дані про сівозміни на початковому етапі відсутні, тому наступним кроком є формування довідника «Сівозміни» для підприємства. IC Soft.Farm надає змогу користувачам створити схеми сівозміни у господарстві з урахуванням сучасних наукових досліджень у даній області. Активувавши поле стовпця «Кроки сівозміни», з'являється вікно (рис. 2.4) із переліком культур довідника «Культури» у схемі сівозміни та вибору періоду їх застосування через вбудований Календар (рис. 2.5).

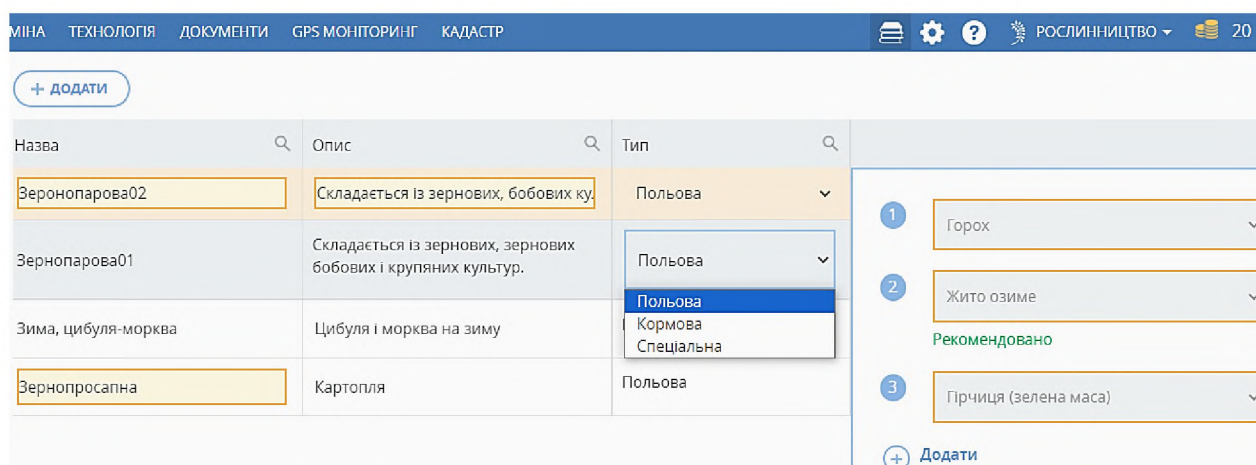


Рисунок 2.4 – Фрагмент заповнення довідника «Схема сівозміни»

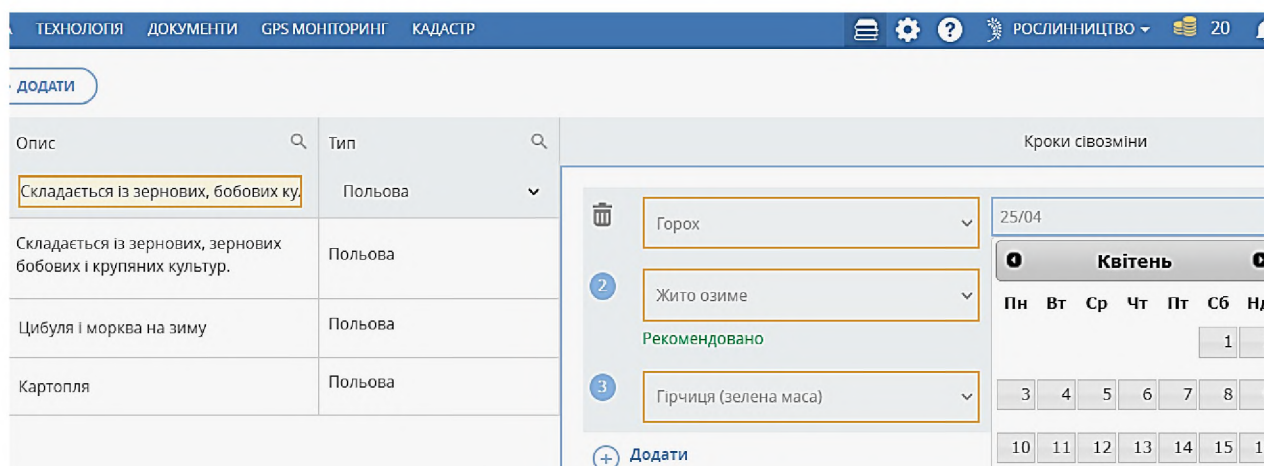


Рисунок 2.5 – Приклад заповнення дат висіву і збору у розділі «Кроки сівозміни»

При вдалому виборі пари попередник–наступник з'являється підпис «Рекомендовано» (або задовільно, погано): агроном має підтримку рішень. Більша частині інструментарію IC Soft.Farm призначена для створення і обробки з максимальною точністю та оперативністю інформації про всі показники полів.

Наведені в подальшому приклади є результатом вивчення та узагальнення досвіду розробки і впровадження IC Soft.Farm у різних підприємствах галузі рослинництва різних регіонів України, надані для вивчення без анонсування конкретних даних в публічному доступі компанією-розробником.

Розглянемо приклади планування і контролю традиційних операцій, пов'язаних із виробничою та управлінською діяльністю галузі рослинництва, у системі Soft.Farm: схеми посівів, результати висіву, планування врожаю та інші. Тут використовується вся попередньо уведена інформація про поля в довідниках.

Для створення посіви у розділі «Сівозміна» є підрозділ «Посів», вікно якого вже містить дані про поля підприємства (дані, які вводились у довідник «Поля») та часовий графік розміщення культур по датам, рокам. Форма «Посіви» заповнюється напівавтоматично зі списками вибору культур, дат, сортів, а також вводиться планова й фактична урожайність, розраховується валовий збір з урахуванням площі поля (рис. 2.6).

Оберіть основну продукцію				
Продукція культури	Запланована врожайність, т/га	Запланований валовий збір, т	Фактична врожайність, т/га	Фактичний валовий збір, т
<input checked="" type="radio"/> Зелена маса	2	320	1.8	288

Рисунок 2.6 – Зображення вікна форми «Посів» із заповненими полями

Вікно відкритої форми дозволяє створювати посіви на відповідних полях площі за вибором культури або на підставі уже створених схем сівозміни. При створенні посіву за вибором культури зручно скористатися списком культур із

довідника системи, вибором сорту. Жовтим відмічені уведені дані включно із планом урожайності. Для уведення даних по датах посіву та збору врожаю передбачене використання календаря із прокруткою по вибору місяця року і дат: у вікні «Посів» буде виведено зображення часового терміну вирощування уведених культур у вигляді кольорових прямокутників із вказанням сорту, планового збору (рис. 2.7).

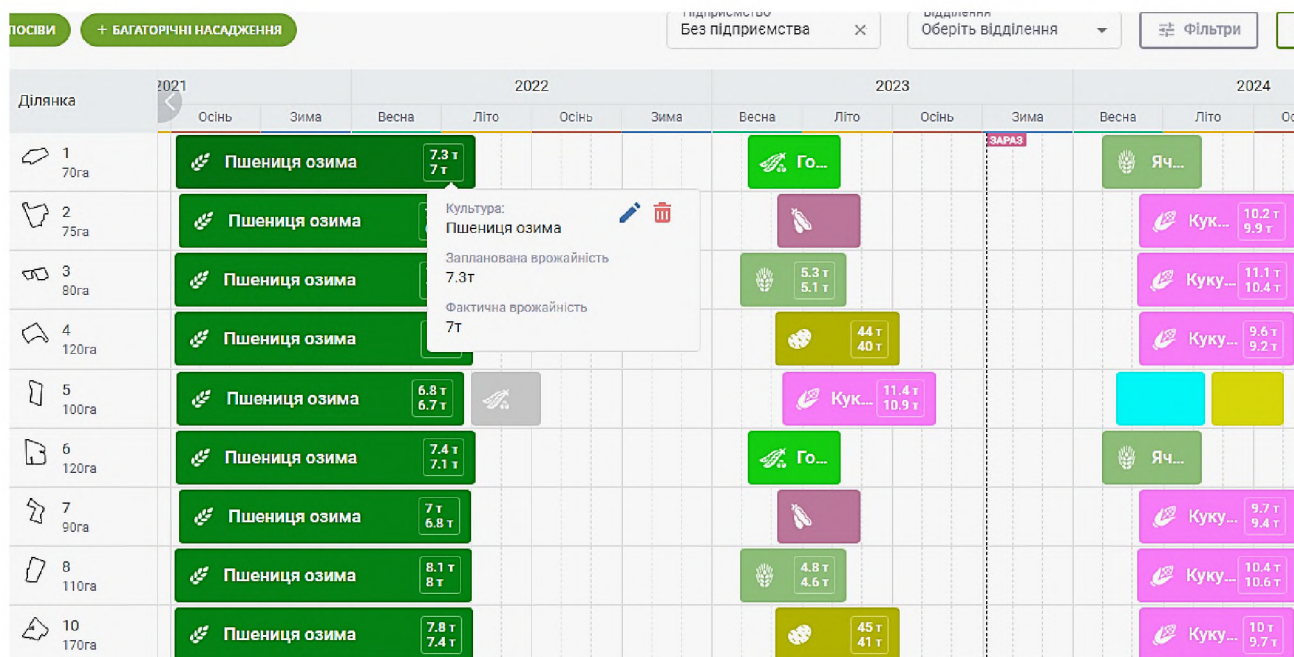


Рисунок 2.7 – Вид плану посівів на ділянках у вікні «Посіви» IC Soft.Farm

Наступні кроки уведення даних про посіви будуть супроводжуватися появою рекомендацій від ІС по вибору наступників для посіву на відповідній ділянці поля із врахуванням попередника. Тобто, ІС, обробивши дані, що уведені у відповідні словники, і ті, що сформовані розробниками ІС по відповідному алгоритму, висвітлює рекомендації по вибору тієї чи іншої культури.

Потужним інструментом є здійснення комплексного аналізу посівних робіт у модулі «Контроль висіву» (рис. 2.8).

Система автоматично розрахує засіяну площу на полі, витрати насіння та внесених добрив, загальний час роботи. Результатом буде створена картограма посіву, за якою можна планувати урожайність, диференційоване внесення добрив, отримати загальну оцінку якості виконаних робіт. На картограмі відображено марки машин, показники якості робіт, витрати часу за кожен день, дані початку/кінця роботи і т. ін.

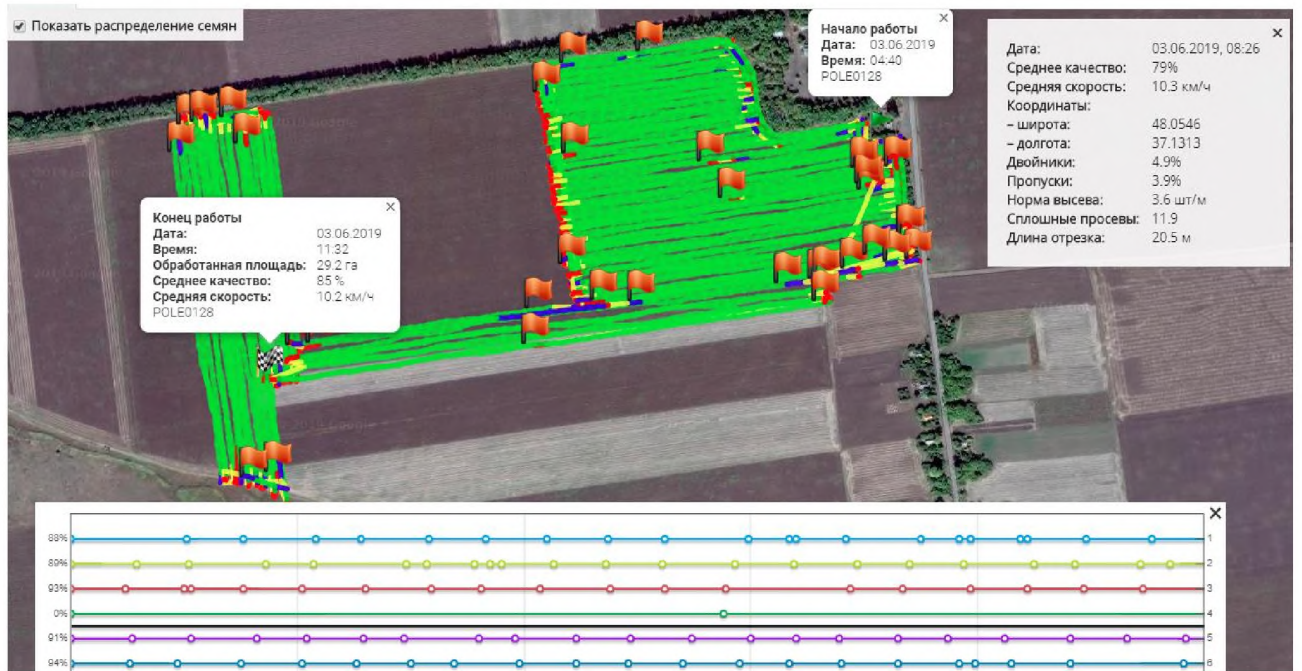


Рисунок 2.8 – Картограма посіву, створена у модулі «Контроль висіву»

Модуль «Контроль висіву» підтримує оперативний контроль посівних робіт під час посівної компанії, а саме переміщення техніки, траєкторію, обсяги внесення тощо (рис. 2.9).

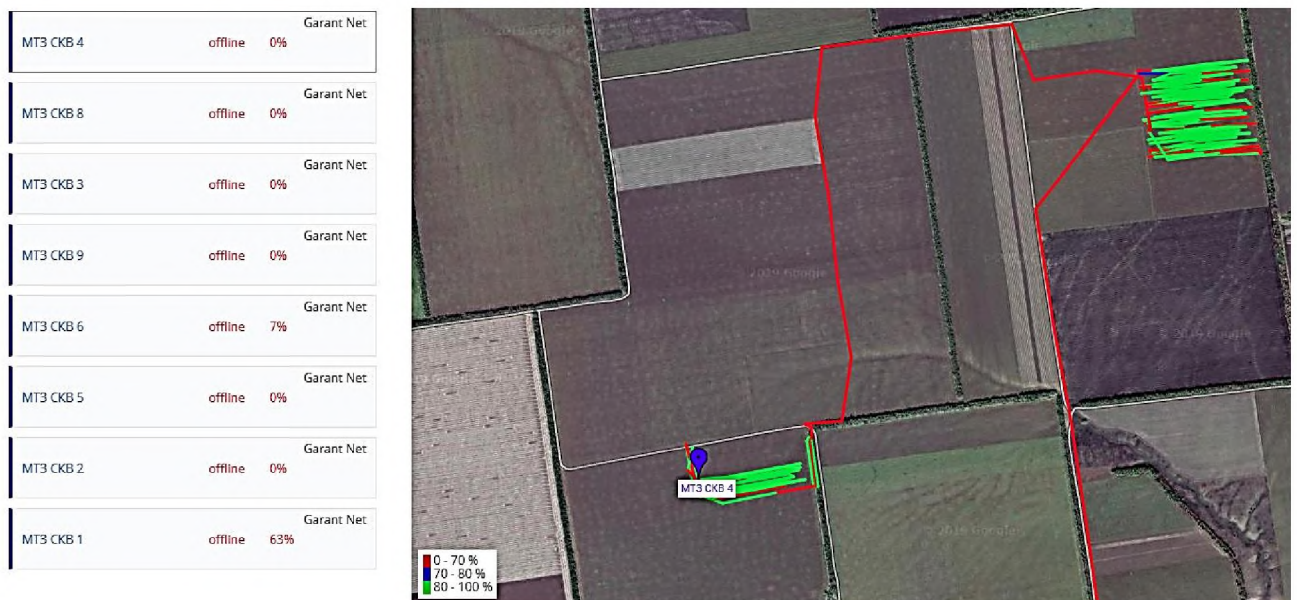


Рисунок 2.9 – Фрагмент контролю руху трактора в процесі посіву зернових

Модуль працює як самостійно, так і в комплексі з іншими підсистемами: технологічними картами, плануванням та закриттям польових робіт, списанням матеріалів, закриває облікові показники і експортує до бухгалтерських систем.

Важливим аспектом управління виробничими процесами є складання виробничого плану, який формується на основі зіставлення результатів аналізу ринку з виробничими можливостями підприємства. IC Soft.Farm у розділі «Виробничий план» в автоматизованому режимі здійснює оцінку доходу від вирощування відповідної культури на вибраній ділянці у запланований період. У результаті автоматизованої обробки попередньо уведених даних (площі ділянок, урожайність) та ціни продукції (прогнознi ціни) буде розрахована дохідна частина (рис. 2.10) як оптимальний план.

культури	Ціна, грн	Усього				Глухове		
		Площа, га	Врожайність, т/га	Валовий збір, т	Дохід, грн	Площа, га	Врожайність, т/га	Валовий збір, т
		405	9.85	5 858	6 282 000.00	100	1.9	190
будзи	3 500.00	80	11	880	3 080 000.00	0	0	0
і	5 800.00	100	1.9	190	1 102 000.00	100	1.9	190
ого	4 000.00	75	7	525	2 100 000.00	0	0	0
юї	см. наст. рік	150	28.42	4 263		0	0	0
	см. наст. рік		0	0			0	0
		70	2.7	189	434 700.00		0	0
	2 300.00	70	2.7	189	434 700.00	0	0	0

Рисунок 2.10 – Виробничий план на обраний рік по запланованим культурам

Для архівації документів та за необхідності подальшого використання результатів обрахунку для виробничого плану передбачений експорт у табличний процесор Excel (рис. 2.10) кнопкою «Експорт в Excel» безкоштовно. Всі дані будуть експортовані, можуть зберігатися в спеціальних папках, використовуватися для здійснення аналітики.

Висновки до розділу 2

Аналіз якісних даних показує, що моделі лінійного програмування широко використовуються в операційних дослідженнях. Задачі LP мають одну цільову функцію, спрямовану на максимізацію прибутку або мінімізацію витрат.

Дослідники встановили, що LP з використанням симплекс-методу допомагає отримати оптимальний план розподілу земель, що підвищує продуктивність і прибутковість господарств.

Моделі змішаного цілочисельного лінійного програмування (ILP) успішно застосовуються у задачах оптимізації площ вирощування окремих культур, планування сівозміни та зрошення, демонструючи стабільні результати та високу задоволеність користувачів.

У деяких випадках задачі в аграрній сфері мають декілька цілей. LP має обмеження при роботі з багатоцільовими задачами. Тому для розв'язання складніших задач LP часто комбінується з іншими підходами: GP, MGP, WGP, MOP. Такі комбінації дозволяють отримувати більш збалансовані результати.

Поступове збільшення потоків великих даних при виконанні виробничих операцій може бути інтегровано та ефективно опрацьовано лише на платформах спеціалізованих інформаційних управляючих систем. Потік даних потребує централізованого оновлення і вчасної доставки.

Для автоматизованого управління виробничими процесами в аграрних підприємствах існує достатньо сучасних рішень типу FMS. Найпотужнішими та популярними з них є системи Cropio, Master: Agro, Soft.Farm, які задовольняють потреби агровиробників у контролі більшості технологічних операцій, підтримують збір і обробку великих обсягів даних на віддалених серверах. Для прикладу серед представлених для впровадження відповідних вітчизняних і зарубіжні платформ розглянута архітектура Soft.Farm.

Для ілюстрації завдань прогнозування показників урожайності в залежності від впливаючих факторів та можливостей FMS для проведення моніторингу даних у наступному розділі наведено практичні кейси з виконання окремих управлінських операцій та використання взаємопов'язаних даних для проведення аналітик і прийняття рішень на прикладі прогнозних функцій Excel та FMS Soft.Farm.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНІ КЕЙСИ ЗДІЙСНЕННЯ ЦИФРОВОГО АНАЛІЗУ, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ДАНИХ ГАЛУЗІ РОСЛИННИЦТВА

3.1 Застосування статистичних методів аналізу даних погодних умов та оцінювання їх впливу на урожайність

Застосування цифрових інструментів та спеціалізованих ІС для аналізу погодних даних, моніторингу оперативних даних про стан посіву, зрештою, методи прогнозування урожайності, є логічним продовженням досліджень, наведених у попередніх розділах.

Реалізація практичних кейсів мала на меті продемонструвати можливості та ефективність застосування стандартного ПЗ і спеціалізованих інформаційних систем (FMS) для цифрової аналітики й моніторингу даних при вирощуванні продукції рослинництва. У даному розділі показано результати проведення цифрового аналізу даних, отриманих із доступних джерел супутникових знімків, погодних умов (наприклад, Visual Crossing Weather), а також методи оцінювання їх впливу на урожайність із використанням доступного програмного забезпечення, зокрема, Google таблиць або Excel, і застосування пакету аналізу даних і статистичних функцій (COUNTIF, CORREL, IF та ін.).

Окрему увагу приділено агроскаутінгу, який є комплексним методом моніторингу посівів і використовує сучасні технології для збору та аналізу даних про стан сільськогосподарських культур. Показано переваги здійснення агроскаутінгу в спеціалізованій інформаційній системі на прикладі Soft.Farm.

Не дивлячись на широкий спектр спеціалізованого ПЗ, зокрема ІС, чимало фермерських господарств, особливо малого розміру, не можуть дозволити їх використання в повній мірі, не мають власних метеостанцій, платних підписок на супутникові знімки та інші сервіси. В таких випадках джерелом даних можуть бути бібліотеки даних, що є у відкритому доступі, а здійснити аналіз таких даних за допомогою стандартного офісного прикладного програмного забезпечення.

Низький поріг входу до цифрового аналізу забезпечується такими інструментами, як Google Таблиці та Microsoft Excel, які дозволяють швидко обробляти масиви погодних і агрономічних даних. У сільському господарстві вони використовуються для:

- обчислення середніх значень, сумарних опадів, амплітуд;
- виявлення аномальних погодних явищ через умовні формули (IF, AVERAGE, STDEV, TREND);
- побудови регресійних моделей для короткострокового прогнозу врожайності;
- аналізу кореляцій між кліматичними показниками та агроефективністю.

Використання таких статистичних методів, як середнє значення, дисперсія, коефіцієнти варіації, ковзне середнє та ін., дозволяє не лише зрозуміти минулі погодні тренди, а й оцінити ризики для майбутніх рішень. Наприклад, аналіз тривалості посух у попередні роки може вказати на доцільність страхування врожаю або зміну сорту культури. Окрему увагу приділяють функціям LINEST, FORECAST.LINEAR, CORREL, які дозволяють будувати аналітичні прогнози прямо у робочих таблицях.

В сучасному агровиробництві моніторинг і аналіз погодних даних відіграють критичну роль у прийнятті своєчасних та ефективних управлінських рішень. Кліматичні умови значною мірою впливають на динаміку росту рослин, розвиток хвороб, строки посіву, режим зрошення, а також очікувану врожайність. Саме тому регулярне відстеження різних метеопоказників - температури, опадів, вологості ґрунту, сонячної радіації - є базою для побудови адаптивної стратегії управління агротехнологіями [64].

Для прикладу розглянуто вирішення задачі щодо аналізу впливу середніх погодних показників в одному з регіонів України на фактичну урожайність кукурудзи. Усі розрахунки базуються виключно на відкритих наборах даних: добові метеоспостереження завнтажено з Visual Crossing Weather (CSV) [65] (додаток А); фактична врожайність кукурудзи в Полтавській області за 2017–2024 рр. з порталу регіональної статистики (області України) SuperAgronom [66].

Фрагмент таблиці з формалізованим набором даних та проведеним аналізом погодних аномалій показано на рис. 3.1.

E2 fx =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 – Приклад аналізу весняних погодних аномалій за даними погоди

Як видно, доволі значний набір даних (доступно для використання щоденні показники за 4 роки) може бути проаналізований в Google Таблиці завдяки формулам та функціям IF, AND, MONTH. Окрім оцінки аномальної погоди «Cold», «Heat» можна додати й інші варіанти.

Показники середньої температури за рік (рис. 3.2), сумарної кількості опадів за рік і т. ін. також зручно проаналізувати в Google Таблиці (рис. 3.3). Вводимо також дані про середню урожайність кукурудзи по рокам у стовпчик E.

B2 fx =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 – Формула середньої температури за рік за статистичними даними

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 – Формула обрахунку сумарної кількості опадів на основі статистичних даних

На основі попередньої обробки даних доцільно провести статистичний аналіз існування зв'язку між показниками середньої температури та урожайності культур, середньорічної кількості опадів та урожайності. Для встановлення тісноти зв'язку між двома рядами даних достатньо використати функцію CORREL() (рис. 3.4).

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 – Показники кореляції середньорічної температури та урожайності (\$G\$2), середньорічної кількості опадів та урожайності (\$G\$3)

Коефіцієнт кореляції між середньорічною кількістю опадів та урожайністю кукурудзи становить $k=0.69$ (рис. 3.4), що свідчить про достатньо високу тісноту зв'язку (більше опадів – істотно вищий результат) і необхідність врахування такого фактора при проведенні агрономічних заходів. Між середньорічною температурою та урожайністю, навпаки, існує помірною обернена залежність ($k=-$

0.39), яка демонструє що, спекотні роки схиляють урожайність донизу. Тобто, вплив існує і додатково варто аналізувати інші температурні показники, наприклад, за період життєвого циклу культури.

В наступному експерименті проведено дослідження впливу кількох факторів на показник урожайності може бути здійснено за допомогою методу множинної лінійної регресії. Функція LINEST, яка доступна в Microsoft Excel та Google Таблицях, є потужним інструментом статистичного аналізу, який дозволяє виконувати множинну лінійну регресію з високою точністю та швидкістю. У контексті аграрного виробництва ця функція є надзвичайно корисною для моделювання залежностей між урожайністю сільськогосподарських культур та впливовими кліматичними факторами, зокрема річною кількістю опадів і середньорічною температурою.

Множинна лінійна регресія, реалізована через LINEST, дозволяє:

- визначити вплив кожного незалежного фактора окремо, контролюючи вплив інших змінних;
- отримати коефіцієнти регресії, які інтерпретуються як середній приріст (або зниження) урожайності при зміні відповідного чинника на одну одиницю;
- оцінити статистичну значущість моделі за допомогою R^2 , стандартної похибки та F-статистики;
- швидко обробляти реальні дані, не вдаючись до складного програмування чи використання спеціалізованих пакетів (напр. R, Python).

У наукових і практичних дослідженнях було показано, що моделі з використанням LINEST здатні з достатнім рівнем точності прогнозувати врожайність. Наприклад, в роботі [67] наведено практичний покроковий посібник із використання лінійної регресії в Excel для прогнозування врожайності пшениці на основі використання добрив. Результати ілюструють, як вчені-аграрії можуть використовувати основні статистичні інструменти для кращого прийняття рішень, залежно від погодних умов.

Функція підтримує аналіз як простої, так і множинної регресії, а в поєднанні з функціями INDEX, TRANSPOSE та IFERROR дає змогу створити

адаптивні аналітичні моделі прямо в таблиці. Це робить LINEST особливо цінним для агрономів, фахівців із точного землеробства та фермерів, які прагнуть ухвалювати рішення на основі історичних кліматичних і виробничих даних.

Функція масиву LINEST розраховує коефіцієнти a , b_1 , b_2 , ... лінійної моделі $Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots$ та інші статистичні показники регресії. Формат: =LINEST(known_y; known_x; calculate_b; verbose). Параметр calculate_b визначає, чи обчислювати вільний член a (TRUE – так, FALSE – примусово через початок координат), verbose = RUE виводить розширену статистику (стандартні похибки, R^2 , F- критерій тощо). LINEST зазвичай вводять як формулу масиву (одночасно у кілька комірок), щоб отримати повний набір результатів.

На рис. 3.5 показано фрагмент аркушу з результатами побудованої множинної лінійної регресії, які отримано для прогнозування рівня урожайності кукурудзи Corn_Yield_t_ha. Для побудови моделі використано три групи показників: середньорічні температури AvgTemp_C, сумарна річна кількість опадів TotalPrecip_mm та середня швидкість вітру AvgWind_mps.

G5 ▾ | fx =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 – Формалізована модель множинної лінійної регресії для визначення характеру зв'язку урожайності кукурудзи з кліматичними факторами

Формат формули в рядку формул: =LINEST (\$E\$2:\$E\$9, { \$C\$2:\$C\$9, \$B\$2:\$B\$9 }, TRUE, TRUE) . Результати розрахунку моделі наступні:

$$\text{Yield} = 1,57 + 0,0058 \text{ Precip} + 0,17 \text{ Temp}; R^2=0,48.$$

Коротка інтерпретація значень коефіцієнтів та пояснення їхнього змісту показано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів множинної лінійної регресії

Коефіцієнт і значення	Пояснення змісту коефіцієнта
$\beta_1_precip = 0,0058 \text{ т/га} \cdot \text{мм}^{-1}$	Кожні +100 мм річних опадів додають $\approx 0,58 \text{ т/га}$.
$\beta_2_temp = 0,17 \text{ т/га} \cdot \text{°C}^{-1}$	Після контролю опадів тепліший рік покращує урожайність (коефіцієнт позитивний), але стандартна похибка $\approx 0,20$ – значущість низька.
$R^2 = 0,48$	Модель пояснює 48 % міжрічної мінливості.
$F = 2,32; p = 0,19$	Для $n = 8$ спостережень обидва предиктори разом не проходять 5%-й рівень значущості – вибірка коротка, в ідеалі використовувати більший ряд даних
Durbin–Watson = 2,01	Автокореляція залишків відсутня

На рис. 3.5 стовпець I у рядках 7–9 містить #N/A: це означає, що функція LINEST просто не повертає там значень, це штатно. Кілька узагальнюючих висновків, які можна зробити за результатами моделі лінійної регресії:

1. Ключовий фактор – опади. Суттєве підвищення вологості сезону корелює з прибавкою врожайності $\sim 0,6 \text{ т/га}$ на кожні +100 мм.

2. Температура у присутності опадів має нестійкий вплив ($\beta \approx 0,17 \pm 0,20$). Це показує, що необхідна більша вибірка, щоб підтвердити тренд.

3. Прогнозна точність ($R^2 \approx 0,5$) достатня для попередніх оцінок ризику в системі Soft.Farm, але для точного планування слід доповнити модель ґрунтовими й технологічними змінними.

Ці джерела демонструють як в доступних інструментах (Excel) можна побудувати регресійні моделі для прогнозування врожайності, використовуючи LINEST() з кліматичними чинниками, як річна кількість опадів і середня температура. Результати показують достатню точність та інтерпретованість, доступну навіть непрофесіоналам.

3.2 Цифрове картування агровиробничих зон із використанням smart-технологій та агроскаутингу

Багаторічний аналіз погодних умов демонструє загалом наявність ризиків, аномалій (рис. 1.), суттєву мінливість. Більшість фермерів констатують, що при

вирощуванні продукції рослинництва з кожним роком ефективно працювати стає все важче, потрібно шукати нові підходи та удосконалювати технології виробництва, аби отримувати стабільні урожаї і зберегти рентабельність навіть у складних умовах.

Система точного землеробства особливо актуальна для України, оскільки це ризикова зона сільського господарства, беручи до уваги строкатість кліматичних умов та неоднорідності полів. Саме в таких умовах точне землеробство дозволяє мінімізувати ризики та оптимізувати витрати, а саме:

- зменшити використання ресурсів (насіння, добрив, ЗЗР, палива);
- адаптувати агротехнічні заходи під реальні умови;
- мінімізувати втрати врожаю від стресів, бур'янів, шкідників і хвороб;
- працювати екологічніше, зберігаючи ґрунти.

Одним із методів оптимізувати витрати на виробництво і при цьому зберегти урожайність є застосування агроскаутингу. Агроскаутинг – це процес виявлення проблемних зон на полі, пов'язаний із розпізнаванням стресових рослин, шкідників або дефіцитів живлення. Це систематичний процес збору та аналізу даних про стан посівів і ґрунту, який дає змогу:

- своєчасно виявляти наявність стресових факторів (посуха, дефіцит живлення, хвороби, шкідники, бур'яни);
- локалізувати проблемні ділянки для точкової обробки замість суцільних внесень;
- прогнозувати урожайність на основі об'єктивних даних.

Сучасні цифрові платформи мають повний набір пристроїв для ведення агроскаутингу, наприклад, дрони, «комп'ютерний зір» та ін.

Комп'ютерний зір дозволяє дронам і мобільним пристроям автоматично розпізнавати тип ураження за фото рослин.

Дрон може здійснювати регулярний обліт і виявляти нові плями на NDVI-карті, або навіть самостійно локалізувати й обробляти уражені зони.

Агроскаутинг є мостом між дистанційним моніторингом і оперативним втручанням. Він дозволяє агроному зосередити увагу на ділянках, які реально

потребують огляду, що економить час і підвищує точність обробок. Без застосування цифрових технологій агроскаутинг є затратним по часу та малоефективним.

Методи проведення агроскаутингу та формування геозон із проблемними характеристиками на електронних мапах можливо провести на прикладі цифрової платформи Soft.Farm, яка містить увесь необхідний набір модулів точного землеробства, при цьому агроскаутинг належить до безкоштовних модулів [33]. Це означає, що будь-який зареєстрований користувач-фермер може сформувати власний набір карт з історіями стану посівів, використовуючи цифровий інструментарій.

Агроскаутинг – це комплексний метод моніторингу посівів, який включає кілька етапів від збору до використання даних. Збір даних може проводитись такими методами:

- агрономи або скаути фізично оглядають поля, щоб виявити ознаки хвороби, шкідників, бур'янів та інших проблем, фіксують на фото вигляд проблеми або стан рослини;
- дрони, які оснащені камерами та датчиками, дають змогу збирати дані про стан посівів із висоти пташиного польоту.

Аналіз даних встановлює:

- стан посівів;
- ризики для врожаю;
- необхідність втручання;
- розробка рекомендацій щодо догляду за посівами на основі аналізу даних.

Виконання всіх етапів проілюстровано на прикладі відповідного модуля «Агроскаутинг» в середовищі FMS Soft.Farm. Платформа об'єднує та інтегрує всі джерела даних: польові, супутникові, дронів, метео- та ґрунтові дані в одну аналітичну базу і дозволяє створювати маршрути агроскаутингу з GPS-прив'язкою для агрономів і скаутів. Щотижневі обходи або за ключовими фазами BVCH + NDVI-карти для виявлення проблемних ділянок, а саме локальні

вогнища шкідників, хвороб та бур'янів. Це збір польових даних (агроскаутинг “в полі”). Скаут фіксує:

- бур'яни (тип, фаза, загроза).
- стан рослин (густота, розвиток, пошкодження);
- хвороби та шкідників (визначення виду, масштаб ураження);

Формат представлення даних: фото, координати, текстові нотатки. Все вноситься через мобільний додаток Soft.Farm, одразу з GPS-прив'язкою [68]: створення електронних карт земельних ділянок аграрних господарств в Soft.Farm, яка інтегрована з Google Earth. Всі дані, зібрані в процесі агроскаутингу, наносяться через GPS-координати на заздалегідь підготовлені контури ділянок. Мобільний та веб-інтерфейси Soft.Farm дозволяють створювати огляди, додавати загрози, генерувати маршрути й контролювати виконання завдань у режимі реального часу. Приклад показано на рис. 3.6.

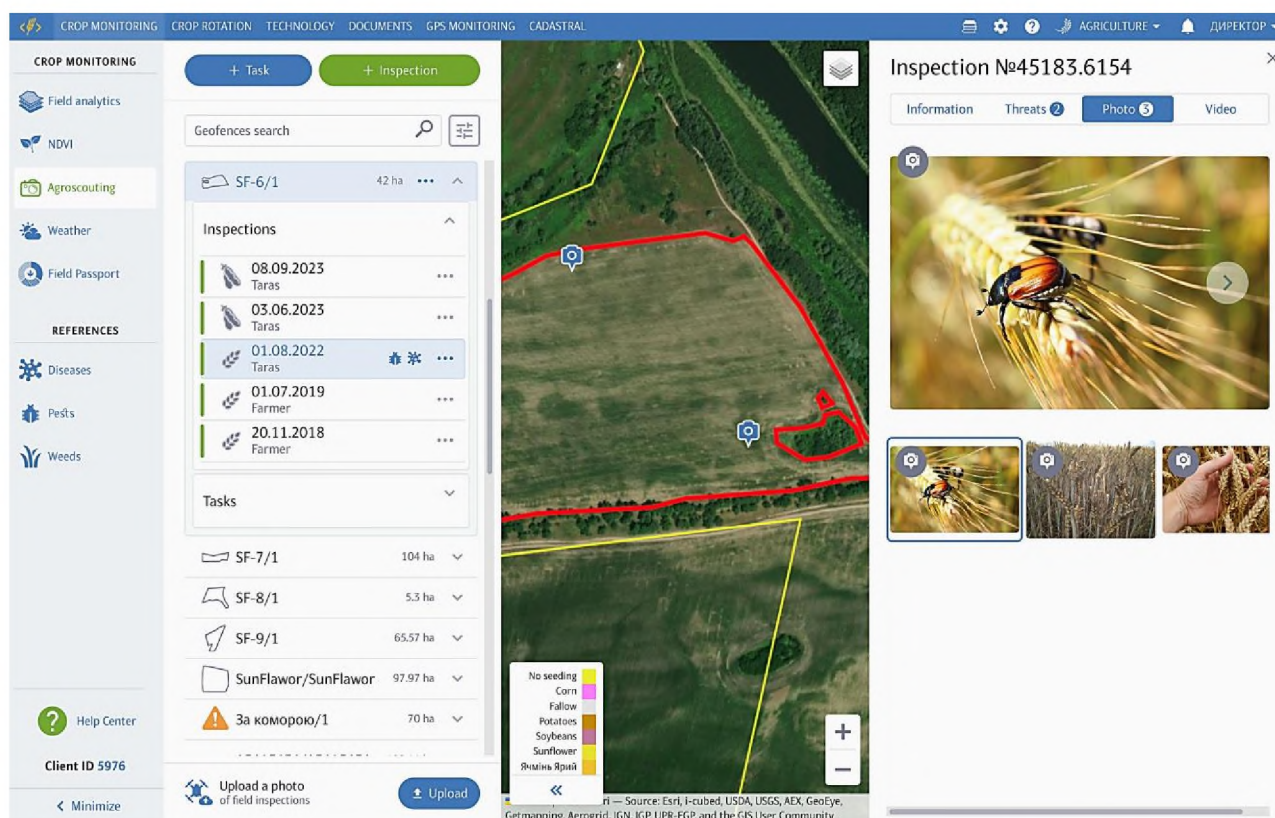


Рисунок 3.6 – Представлення інформації про обстежені ділянки поля з нанесенням координат локалізації знімків та збереження в базі даних Soft.Farm

На панелі зліва переглядають виконані огляди, де збережено дату, виконавця, культуру, завдання і результати.

Зображення, які надали скаути (будь-то агроном або дрон) можна переглянути в системі як на бічній панелі Inspection, так і відкрити безпосередньо на електронній карті, де проставлений значок (рис. 3.7).

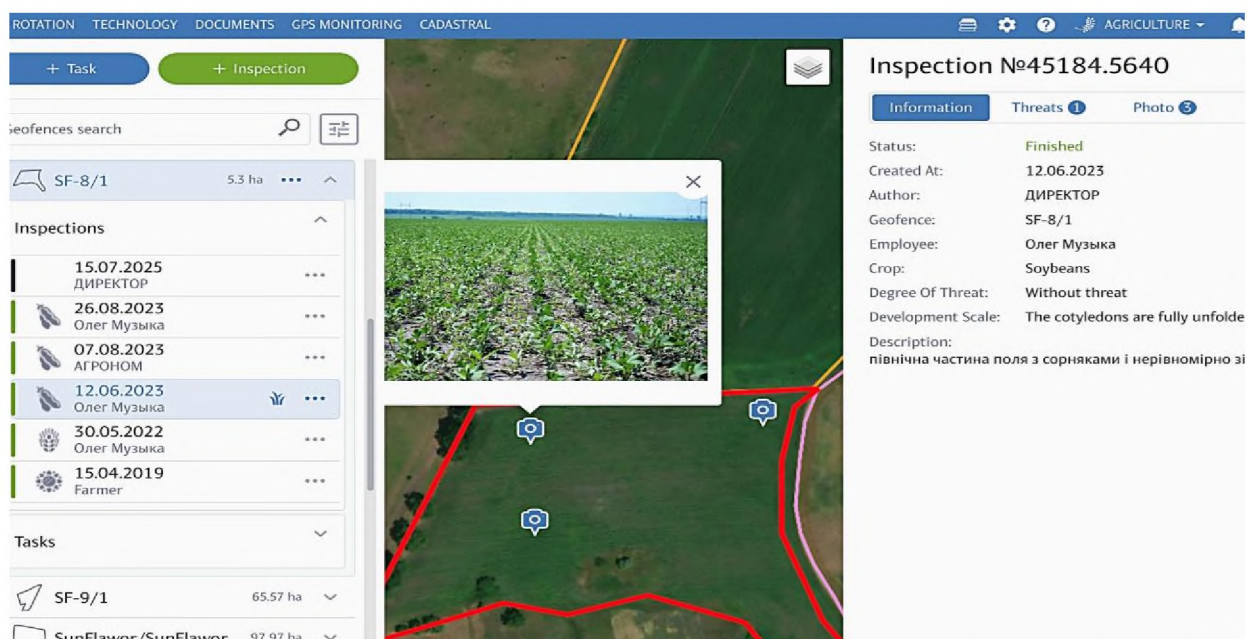


Рисунок 3.7 – Перегляд та аналіз зображень на ділянках поля в Soft.Farm

На панелі справа виведено всю інформацію про конкретний знімок, яка включає статус, дату, шифр геозони, культуру, зафіксований стан культури, короткий опис фахівця. Перелік всіх шкідників та хвороб рослин в спеціалізований FMS занесений на етапі розроблення самої системи у вигляді окремих довідників, як і перелік добрив, машин і т.ін. Формування завдань для точкової обробки поля відбувається також в системі.

Застосування агродронів є надзвичайно ефективним інструментом збору і передавання даних в процесі агроскаутингу. Оснащені мультиспектральними або гіперспектральними камерами, вони проводять швидку зйомку великих площ полів. Висока роздільна здатність зображень дозволяє бачити найдрібніші деталі, які важко виявити неозброєним оком. Політ дрона планується за допомогою спеціального програмного забезпечення, такого як DroneDeploy, де

задається маршрут та параметри висоти зйомки. Дані з камер дронів зберігаються для подальшого аналізу. Обробка даних відбувається у реальному часі одразу на борту дрона або через програмне забезпечення.

Більш комплексну картину, звичайно, отримують із застосуванням NDVI-карт (Normalized Difference Vegetation Index), які створюються на основі даних мультиспектральних камер, щоб визначити, наскільки добре рослини поглинають світло, бо це показує їхнє здоров'я.

Цифровий контур поля, інтеграція GPS-даних, NDVI та карт продуктивності створює повну просторову картину для аналітики. Таким способом агроскаутинг поєднує польову експертизу і smart-технології, забезпечуючи швидкі, економічні й дано-орієнтовані рішення для підвищення стабільності врожаїв.

Серед розглянутих smart-технологій додавання інструментів штучного інтелекту [69] значно прискорює розпізнання та класифікацію зображень, що дозволяє обробляти значну кількість знімків та набагато оперативніше формувати управлінські рішення. FMS з інтегрованим ШІ на сьогодні використовуються великими підприємствами і холдингами, у той час, як для середніх і малих підприємств вони є недоступними, зокрема, через високі тарифи або відсутність технічно-комунікаційних складових.

3.3 Обґрунтування ефективності впровадження систем автоматизації виробничих процесів та цифрової аналітики в аграрних підприємствах

Економічний ефект від впровадження інформаційної системи проявляється через окупність інвестицій та отримання вищих виробничих показників (урожайності, доходності, рентабельності та ін.) господарської діяльності завдяки переходу на новий рівень управлінських та облікових процесів досягнення оптимальних витрат шляхом переозподілу ресурсів. Загалом, ефективність впровадження ІС має декілька основних проявів [70].

1) Технологічний: застосування новітніх технологій дозволяє використовувати та управляти сучасними агротехнологіями, використовувати для збору і передачі даних датчики, системи GPS-моніторингу транспорту, супутникові знімки стану посівів, застосовувати методи точного землеробства, проводити аналітику, а відтак підвищувати рентабельність.

2) Організаційний: удосконалення організаційної структури підприємства, перерозподіл обов'язків персоналу і переведення багатьох робіт в площину автоматизації, отримання економії робочого часу і вирішення більшої кількості задач в одиницю часу; покращення обліку робочого часу і підвищення виконавської дисципліни, відповідальності.

3) Економічний: досягнення окупності вкладень, підвищення прибутку і рентабельності за рахунок зниження прямих витрат на виробництво і т. ін.

У будь-якому з перших двох пунктів також присутня економічна складова. Базисом для викладення міркувань про ефективність впровадження ІС мають бути дані як про діяльність конкретного підприємства, так і вартісні показники самої інформаційної системи.

Ефективність використання інформаційних технологій та ефективність функціонування інформаційної системи управління виробничими процесами агропідприємства в цілому визначається за відповідністю критерію (3.1):

$$f(r, t) \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де r – загальна кількість ресурсів, що витрачаються на автоматизацію управління (матеріальні, інтелектуальні, трудові);

t – час стабілізації функціонування підприємства.

При цьому при плануванні мінімізується в основному r , а при оперативному управлінні – t . Оцінювання економії ресурсів за різними методиками (наприклад [36]) показали значну економію пального, робочого часу, посівного матеріалу, гербіцидів і добрив, ЗЗР за рахунок застосування GPS-контролю техніки, а також застосування технологій паралельного водіння, які дозволяють зменшити зони перекриття або пропуски при технологічних операціях. За даними, оприлюдненими компанією ТОВ «Кварт Софт», яка є

офіційним розробником і постачальником IC Soft.Farm, у розрізі використання кожного з модулів спостерігається значний економічний ефект. В табл. 3.2 наведено зведену інформацію щодо ефективності використання модулів «Земельний банк» та «Агротехнологія». Оцінювання показників здійснено в перерахунку на умовні 1000 га площі поля (дані отримані з багатьох господарств, взято усереднені дані). Для розрахунків використано усереднені ціни на дизельне паливо за перше півріччя 2025 р., вартість 1 т комплексного (азотно-фосфорно-калійного) мінерального добрива Нітроамофоска-М: NPK 9:18:22, які відповідно складають: 56,46 грн/л дизельного пального [71], 26100 грн/т комплексного добрива [72]. Наведені цифри носять інформаційний характер та не є предметом конкретних угод.

Таблиця 3.2 – Підрахунок підвищення прибутковості окремих робіт при використанні модулів IC Soft.Farm (за цінами станом на 3 квартал 2025 р.)

Вид ресурсу	Відсоток зменшення витрат/1000 га	Заощаджений ресурс, одиниць /1000 га	Середня вартість (прибутковість) за т (га), грн	Економія в грошовому вимірі, грн
Обліковані земельні угіддя (поля, ділянки), га	3 %	30	11200	336000
Мінеральні добрива при внесенні, т	15 %	30	26100	783000
Паливо при виконанні польових робіт (паралельне водіння), л	10 %	800	56,46	45168
Сумарний показник	-	-	-	1 164 168

Отже, лише завдяки застосуванню 4-х модулів системи і отриманому точному вимірюванню земельних угідь, контролю внесення добрив (1 виду), застосуванню контролю витрат палива при виконання окремих операцій складе не менше 1 164,17 тис. грн. Додаткові прибутки (зменшення витрат) відбуваються за рахунок прорахованих управлінських рішень при застосуванні інших модулів системи.

Наступним етапом оцінки ефективності впровадження ІТ управління підприємством [70] є розрахунок витрат на ІТ, визначення обсягу інвестицій, які необхідні для досягнення поставленої мети. Оцінка витрат на інформаційну технологію складається із двох етапів: оцінки усіх капітальних і поточних витрат, пов'язаних із впровадженням і використанням ІТ, та оцінки обґрунтованості величини витрат на проект. Розглянемо їх більш детально.

Перший крок. Оцінка витрат по проекту передбачає визначення усіх капітальних і поточних витрат пов'язаних із впровадженням та використанням інформаційної технології.

Даний крок передбачає визначення витрат від простоїв пов'язаних з плановою або неплановою зупинкою роботи інформаційної технології та інших можливих втрат.

Визначення величини можливих втрат здійснюється на основі статистичних даних щодо впровадження подібних інформаційних технологій або за даними, накопиченими на підприємстві.

Досвід компаній, що впроваджують ІС дозволяє зробити припущення, що загальна величина витрат по проекту може бути розрахована за формулою:

$$Z_{заг}^{IT} = Z_n + Z_{н} + Z_{ум} + P, \quad (3.2)$$

де $Z_{заг}^{IT}$ – загальні витрати на проект впровадження інформаційних технологій;

Z_n – прямі витрати на впровадження ІТ;

$Z_{н}$ – оцінка непрямих витрат на проект впровадження;

$Z_{ум}$ – сума витрат на утримання ІТ за період їх життєвого циклу;

P – можливі втрати від простоїв або збоїв у системі.

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.

Попередні розрахунки статей прямих витрат, обчислені за формулою (3.2) на базі усереднених даних за 2024 р. та на основі середніх показників при

впровадженні аналогічних проектів у сільськогосподарських підприємствах, виконаних за посередництва компанії «Кварт-Софт», наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні статті прогнозних витрат на реалізацію проекту з впровадження корпоративної ІС Soft.Farm [73]

№п/п	Статті прямих витрат	Сума витрат, грн
1	Купівля повного пакету «Безліміт»	15500
2	Купівля додаткового обладнання для роботи ІТ (окрім ПК)	9400
3	Складання технічного завдання	18000
4	Виконання робіт зі створення єдиної бази підприємства за допомогою фахівців компанії (3600 грн добова оплата*10 днів)	36000
5	Поточне обслуговування робочих місць та каналів комунікацій протягом року (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 ІТ на рік	153600
9	Всього витрати (поз.7+8)	332600

Як бачимо, сумарні витрати (див. табл. 3.3) складатимуть близько 332,6 тис. грн. Порівнюючи результати обрахунків доходної частини (див. табл. 3.1) і витрат (див. табл. 3.2), впровадження багатомодульної ІС не лише позитивно впливає на якість виробничих процесів, але й матиме значний економічний ефект. Зниження сукупних матеріальних виробничих витрат навіть на 5-15 % дозволяє отримати близько 831,6 тис. грн економічного ефекту за один сезон. Це дозволить покрити головні витрати на купівлю і впровадження ІС, а також дозволить проводити подальшу модернізацію робочих місць, підвищувати якість та екологічність продукції, розширювати канали збуту тощо.

Висновки до розділу 3

Отримані результати застосування комплексного аналізу низки факторів, які прямо або опосередковано мають вплив на урожайність сільськогосподарських культур та ресурсну складову агробізнесу.

Проведені статистичні дослідження із застосуванням інструментів електронних таблиць демонструють, що відкрита погодна статистика та доступні офісні інструменти дозволяють кількісно оцінити вплив опадів і температури на врожайність агрокультур в будь-якому регіоні. Це допоможе аграріям на тлі інформаційних повідомлень про очікувані погодні умови приймати вивірені рішення щодо вибору агротехнологічних заходів для отримання стійкого урожаю та збереження ресурсів. Такі підходи ефективні в регіонах із обмеженим доступом до складних аналітичних систем, оскільки не потребують додаткового програмного забезпечення.

Моніторинг, прогнозування та агроскаутинг утворюють ядро точного землеробства. Вони дозволяють приймати рішення на основі фактичних даних, знижувати витрати, зменшувати екологічне навантаження і підвищувати врожайність. Інтеграція ШІ, дронів, IoT і ГІС забезпечує цілісний підхід до управління полем і дає фермерам конкурентні переваги в умовах зміни клімату і зростання потреб у продуктах харчування.

Система забезпечує генерацію й обмін електронними документами у всіх традиційних форматах та затверджених державним законодавством формах.

Ефективність використання новітніх інформаційних технологій та ефективність функціонування інформаційної системи управління виробничими процесами агропідприємства в цілому оцінюється за загальним критерієм досягнення мінімізації всіх ресурсів, що витрачаються на впровадження і часом стабілізації (окупності) функціонування підприємства.

Економічний ефект оцінювався методом розрахунку окупності системи й показав термін менше 1 року. Окупність впровадження системи досягається завдяки зменшенню витрат всіх видів ресурсів при виконанні більшості робіт і технологічних операцій.

ВИСНОВКИ

Застосування цифрових технологій в агросекторі не випадково називають «блакитним океаном» для досягнення управлінських результатів нового рівня. Впровадження інновацій забезпечує точність вимірювань, швидкість збору даних та їх опрацювання, ефективність прийняття оперативних і стратегічних рішень, контроль за якістю та складом продукції, розширення ринків збуту.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено дослідження сучасних трендів цифрових перетворень регулярних даних в агровиробництві, стану використання спеціалізованих інформаційних систем управління виробничими процесами в галузі сільського господарства. На основі роботи можна сформулювати наступні висновки.

1. Аграрне виробництво завдяки об'єктивним природним, світовим технічним та економічним процесам поступово перетворюється в одну з найбільш наукоємних сфер у розрізі Агрокультури 4.0, все більше використовує цифрові технології, системи точного землеробства, потребує сучасного програмного забезпечення, систем збирання і моніторингу даних, заснованих на потужних і безвідмовних комунікаціях. Окремі види даних можуть бути інтегровані та ефективно опрацьовано лише на платформах спеціалізованих інформаційних управляючих систем.

2. Лінійне програмування з використанням симплекс-методу дозволяє оптимізувати план розподілу земель, що підвищує продуктивність і прибутковість господарств. Моделі змішаного цілочисельного лінійного програмування застосовуються для оптимізації структури посівів культур, планування сівозміни та зрошення, кормових раціонів і графіків зрошення, демонструючи стабільні результати та задоволеність користувачів. Усі розглянуті застосування LP демонструють можливість визначення оптимального допустимого рішення в заданих умовах.

3. Моделі на основі використання прогностичних функцій Excel LINEST здатні з достатнім рівнем точності прогнозувати врожайність. Функція підтримує аналіз як простої, так і множинної регресії, а в поєднанні з функціями

INDEX, TRANSPOSE та IFERROR дає змогу створити адаптивні аналітичні моделі прямо в таблиці.

4. Методи проведення моніторингу даних (агроскаутингу) та формування на електронних мапах геозон із проблемними характеристиками показано на основі FMS Soft.Farm, яка містить увесь необхідний набір модулів точного землеробства. Цифровий контур поля, інтеграція GPS-даних, NDVI та карт продуктивності створює повну просторову картину для аналітики. Таким способом агроскаутинг поєднує польову експертизу і smart-технології, забезпечуючи швидкі, економні й дано-орієнтовані рішення для підвищення стабільності врожаїв.

5. Оцінювання ефективності впровадження й використання інформаційних систем в агропідприємствах показало, що основним джерелом досягнення економічного ефекту є підвищення точності обліку використання ресурсів (земельних, добрив, ЗЗР, насіння, робочого часу, ПММ та ін.), прийняття оптимальних рішень в управлінні всіма процесами. Загальний показник економії матеріальних виробничих витрат за середньостатистичним даними може складати до 30 % щорічного чистого прибутку.

Практичні результати даної роботи як систематизований науковий, практичний матеріал, який пройшов апробацію (Додаток Б), можуть бути рекомендовані для ознайомлення спеціалістам в галузі сільського господарства.

Напрямки подальших досліджень передбачають розвиток методологій моделювання урожайності культур із врахуванням широкого набору факторів, які важко формалізуються, із застосуванням штучного інтелекту. Такі моделі аналізують історичні погодні дані, стан ґрунту, рельєф, обробки, і на цій основі прогнозують майбутній урожай.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вебінари в рамках дії програми «Підтримка діяльності підприємств АПК засобами сучасних інформаційних систем і технологій». Департамент. *Департамент*. URL: <https://apk.adm-pl.gov.ua/novina/vebinari-v-ramkah-diyi-programi-pidtrimka-diyalnosti-pidpriemstv-apk-zasobami-suchasnih> (дата звернення: 07.11.2025).
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: 07.11.2025).
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: 07.11.2025).
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: 07.11.2025).
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: 07.11.2025).
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: 07.11.2025).

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: 07.11.2025).

11. Sustainable Food Systems. *One Planet network*: вебсайт. URL: <https://www.oneplanetnetwork.org/programmes/sustainable-food-systems/about> (дата звернення: 07.11.2025).

12. Emissions Gap Report 2022. *UNEP - UN Environment Programme*. URL: <https://surl.li/vpdddm> (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: 07.11.2025).

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: 07.11.2025).

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/10.15150/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: 07.11.2025).

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). P. 7–23. DOI: 10.1007/s11119-005-0681-8.

24. Точне землеробство. *Agrilab*. URL: <https://www.agrilab.ua/services/tochne-zemlerobstvo/> (дата звернення: 12.11.2024).

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). P. 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). P. 407–415. DOI: 10.2134/agronj2005.0240.

27. What is the plattform Industrie 4.0? Plattform Industrie 4.0: вебсайт. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Home/home.html> (дата звернення: 07.11.2025).

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. p. 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: 07.11.2025).

35. Client-server architecture. URL: <https://training.qatestlab.com/blog/technical-articles/client-server-architecture/> (дата звернення: 07.11.2025).

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: 07.11.2025).

38. Тітова О. П. Особливості та переваги використання новітніх інформаційних технологій в управлінні агрохолдингу «Укрлендфармінг». *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2012. № 2(2). с. 90-96.

39. Городецький О. С., Коваленко Р. В. Системи сучасних інтенсивних технологій: посібник до практик і самот. 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: 07.11.2025).

41. Varma, A., Nath, A. S., & Regikumar, V. An agricultural resources optimization model. *IEEE India Conference (INDICON)*, 2012. P. 1278–1283. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDICON.2012.6420778>.

42. 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>.

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

44. Mellaku, M. T., Reynolds, T. W., & Woldeamanuel, T. Linear programming-based cropland allocation to enhance performance of smallholder crop production: A pilot study in Abaro Kebele, Ethiopia. *Resources Journal*. 2018. Vol. 7. No. 4. P. 1–15.

45. 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>.

46. 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.
47. Taha, H. A. Modeling with Linear Programming. In: *Operations Research: An Introduction*. 8th ed. USA: Pearson Education, 1972. P. 13–14.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. 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>.
53. 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/ijdne.150212>.
54. 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>.

55. 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>.

56. 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.

57. 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>.

58. Sofi, N. A., Ahmed, A., Ahmad, M., & Bhat, B. A. Decision Making in Agriculture: A Linear Programming Approach. *International Journal of Modern Mathematical Sciences*, 2015. Vol. 13. No. 2. P. 160–169.

59. 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>.

60. Sharma, D. K., Jana, R. K., & Gaur, A. Fuzzy goal programming for agricultural land allocation problems. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 2007. Vol. 17. No. 1. P. 31–42. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR0701031S>.

61. Taftteh, A., Babazadeh, H., Ebrahimipak, N. A., & Kaveh, F. Optimization of irrigation water distribution using the MGA method and comparison with a linear programming method. *Irrigation and Drainage*, 2014. Vol. 63. No. 5. P. 590–598. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.1838>.

62. Fasakhodi, A. A., Nouri, S. H., & Amini, M. Water Resources Sustainability and Optimal Cropping Pattern in Farming Systems: A Multi-Objective Fractional Goal Programming Approach. *Water Resources Management*, 2010. Vol. 24. No. 15. P. 4639–4657. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9687-7>.

63. IT-Enterprise. URL: <https://www.it.ua/> (дата звернення: 07.11.2025).

64. 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.

65. Total Weather Data. *Visual Crossing*. URL: <https://www.visualcrossing.com/weather-data/> (дата звернення: 07.11.2025).

66. *Superagronom.com*. URL: <https://superagronom.com/articles/764-kukurudzyana-statistika-ploschi-valoviy-zbir-ta-urojainist-zernovoyi-za-2017-2024-rr#:~:text=1> (дата звернення: 07.11.2025).

67. Halder, N. How to use linear regression in agricultural science using Excel: a step-by-step guide with simulated data. *Data Analytics Mastery*. 2025. URL: <https://medium.com/analytics-mastery/how-to-use-linear-regression-in-agricultural-science-using-excel-a-step-by-step-guide-with-d6bd9c2a667d> (дата звернення: 07.11.2025).

68. 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>.

69. Wang, Y., Zhang, Q., Yu, F., Zhang, N., Zhang, X., Li, Y., Wang, M., & Zhang, J. Progress in Research on Deep Learning-Based Crop Yield Prediction. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. No.10:2264. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14102264>.

70. Гарнаженко М. А. Оцінювання показників економічної ефективності діяльності ІТ-компанії. Матеріали науково-практичної конференції за результатами виробничої практики, Вип. XI, м. Полтава. Полтава: ПДАУ, 2025.

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

72. 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: 12.11.2024).

73. Тарифні пакети використання системи Soft.Farm. URL: <http://www.soft.farm/uk/site/cost> (дата звернення: 07.11.2025).