

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ
Циклова комісія (кафедра) комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему
**РОЗВИТОК ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗУМНОГО
ФЕРМЕРСТВА**

Виконав: студент групи 2П-21

Спеціальності

121 Інженерія програмного забезпечення

Руслан НЕХ

Керівник:

Станіслав МАРЧЕНКО

Черкаси 2025

ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ

Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

Спеціальність 121 «Інженерія програмного забезпечення»

Освітня програма Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІ та ІТ

Владислав ХОТУНОВ

(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Неху Руслану Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема випускної роботи Розвиток та впровадження технологій розумного фермерства

Керівник роботи Марченко Станіслав Віталійович, спеціаліст I категорії

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» жовтня 2024 року № 68у.

2. Строк подання студентом випускної роботи 03.06.2025

3. Вихідні дані до випускної роботи мова програмування Python, фреймворк для побудови графічного інтерфейсу користувача PyQt6, універсальна мова моделювання (UML), бібліотеки OpenCV, NumPy, scikit-learn, Matplotlib.

4. Зміст випускної роботи (перелік питань, які потрібно розробити) огляд поточного стану предметної області (поняття та принципи розумного фермерства, огляд існуючих систем розумного фермерства, програмні та апаратні засоби, що використовуються в агротехнологіях, постановка задачі дослідження), проектування та реалізація програмного забезпечення (аналіз вимог до програмного забезпечення, що розробляється, моделювання предметної області, програмна реалізація проєкту), рекомендації щодо впровадження та експлуатації програмної системи (тестування програмної системи, впровадження системи, склад інсталяційного пакету).

5. Дата видачі завдання 15.09.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання з підписами керівника і студента
1	Вступ	14.10.2024	
2	Розділ 1. Огляд поточного стану предметної області	09.12.2024	
3	Розділ 2. Проектування та реалізація програмного забезпечення	10.03.2025	
4	Розділ 3. Рекомендації щодо впровадження та експлуатації програмної системи	28.04.2025	
5	Висновки	12.05.2025	
6	Оформлення кваліфікаційної роботи (чистовий варіант)	26.05.2025	
7	Перевірка кваліфікаційної роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	02.06.2025	
8	Подання кваліфікаційної роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	10.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Руслан НЕХ

Керівник роботи _____
(підпис)

Станіслав МАРЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто концепцію розумного фермерства як інноваційної парадигми агровиробництва, що передбачає використання цифрових технологій для моніторингу, аналізу та прийняття управлінських рішень у сільському господарстві. Метою дослідження є розробка та впровадження програмної системи для автоматизованої класифікації стану ґрунтів на основі супутникових знімків із використанням методів індексного аналізу та алгоритмів машинного навчання. У роботі проведено аналіз вимог до програмного забезпечення, UML-моделювання архітектури системи, реалізацію модульної структури з графічним інтерфейсом користувача (PyQt6), інтеграцію класифікаторів SVM та нейронних мереж, формування HTML-звітів і тестування працездатності в автономному режимі. Запропонована система орієнтована на малі та середні фермерські господарства України, забезпечує локальну обробку даних без потреби у підключенні до мережі Інтернет, а також підтримує масштабованість і подальший розвиток функціональності.

Ключові слова: розумне фермерство, супутникові знімки, стан ґрунтів, машинне навчання, індекс NDVI, PyQt6, SVM, нейронна мережа, автоматизована класифікація.

ABSTRACT

The work explores the concept of smart farming as an innovative paradigm in agricultural production, emphasizing the use of digital technologies for monitoring, analysis, and decision-making in the agricultural sector. The research aims to develop and implement a software system for automated soil condition classification based on satellite imagery using index analysis methods and machine learning algorithms. The study includes requirements analysis, UML-based system modeling, modular software implementation with a graphical user interface (PyQt6), integration of SVM classifiers and neural networks, generation of HTML reports, and testing in offline conditions. The proposed system is designed for small and medium-sized farms in Ukraine, supports local data processing without requiring Internet access, and is scalable for further functionality extension.

Keywords: smart farming, satellite imagery, soil condition, machine learning, NDVI index, PyQt6, SVM, neural network, automated classification.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- FAO – Food and Agriculture Organization, продовольча та сільськогосподарська організація ООН
- IoT – Internet of Things, Інтернет речей
- SVM – Support Vector Machines, метод опорних векторів
- NDVI – Normalized Difference Vegetation Index, нормалізований диференційний вегетаційний індекс
- BSI – Bare Soil Index, ґрунтовий індекс
- ISO/IEC – Міжнародна організація зі стандартизації / Міжнародна електротехнічна комісія
- IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers
- GNSS – глобальні навігаційні супутникові системи
- GIS – геоінформаційні системи
- БПЛА – безпілотні літальні апарати
- GNDVI – Green Normalized Difference Vegetation Index, зелений нормалізований диференційний вегетаційний індекс
- SAVI – Soil-Adjusted Vegetation Index, ґрунтовий вегетаційний індекс
- NDRE – normalized difference red edge index
- FMS – Farm Management Systems, системи фермерського менеджменту

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ПОТОЧНОГО СТАНУ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	5
1.1 Поняття та принципи розумного фермерства.....	5
1.2 Огляд існуючих систем розумного фермерства	10
1.3 Програмні та апаратні засоби, що використовуються в агротехнологіях.	14
1.4 Постановка задачі дослідження	16
Висновки до першого розділу	17
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	19
2.1 Аналіз вимог до програмного забезпечення, що розробляється.....	19
2.2 Моделювання предметної області	22
2.3 Програмна реалізація проєкту	27
Висновки до другого розділу	33
РОЗДІЛ 3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ.....	35
3.1 Тестування програмної системи	35
3.2 Впровадження системи	38
3.3 Склад інсталяційного пакету	40
Висновки до третього розділу	41
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45
ДОДАТКИ	47

ВСТУП

У контексті глобальних змін клімату, демографічного зростання та зростаючого попиту на продовольство аграрний сектор стикається з новими викликами, які потребують впровадження інноваційних технологій управління виробничими процесами. Розумне фермерство (smart farming) – це сучасна парадигма агровиробництва, що базується на використанні цифрових технологій, Інтернету речей (IoT), супутникових даних, машинного навчання та аналітики даних для прийняття обґрунтованих рішень щодо ведення сільського господарства [1, с. 12].

Використання розумного фермерства дозволяє не лише підвищити врожайність і ефективність господарської діяльності, а й зменшити витрати ресурсів, покращити екологічну сталість та забезпечити стаке управління земельними і водними ресурсами [2, с. 47]. Водночас рівень впровадження таких технологій в Україні залишається фрагментарним і обмеженим, що свідчить про актуальність дослідження механізмів їх розробки, адаптації та реалізації в умовах вітчизняного агросектора.

У світовій науковій літературі проблематика розумного фермерства досліджується досить активно. Значну увагу цьому питанню приділено у працях провідних фахівців у галузі цифрових агротехнологій, зокрема [3, с. 115], де розглядаються прикладні аспекти впровадження IoT-систем для моніторингу стану ґрунтів і кліматичних умов. Вітчизняні дослідники, такі як О. О. Бачинський, В. І. Литвин та інші [4, с. 83], акцентують увагу на потенціалі цифровізації сільського господарства в умовах трансформації українського АПК. Проте, незважаючи на існуючі наукові напрацювання, відсутній комплексний підхід до інтеграції різних типів даних, адаптації моделей прийняття рішень та верифікації результатів у реальних умовах фермерських господарств.

Метою дослідження є розробка та практична реалізація технологічного рішення для впровадження системи розумного фермерства на основі сучасних інформаційних технологій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) провести аналіз сучасного стану розвитку технологій smart farming;
- 2) дослідити наявні інструменти збору, обробки та аналізу аграрних даних;
- 3) розробити модель функціонування інформаційної системи розумного фермерства;
- 4) реалізувати програмний прототип із використанням супутникових знімків і алгоритмів машинного навчання;
- 5) провести тестування та верифікацію працездатності запропонованої системи в умовах, наближених до реальних.

Об'єктом дослідження є інформаційні технології в аграрному секторі.

Предметом дослідження є методи і засоби збору, обробки та аналізу аграрних даних з метою автоматизації процесів прийняття рішень у системах розумного фермерства.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження розумного фермерства як інноваційної концепції агровиробництва в умовах глобальних викликів. Сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, що спрямовані на створення інформаційної системи для автоматизованого аналізу аграрних даних. Зазначено необхідність практичної реалізації та верифікації технологічного рішення, адаптованого до умов українського сільського господарства.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПОТОЧНОГО СТАНУ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Поняття та принципи розумного фермерства

Розвиток аграрного сектору в умовах цифрової трансформації економіки призвів до виникнення нової парадигми ведення сільського господарства – розумного фермерства (smart farming), яке є логічним продовженням еволюції від традиційних до високотехнологічних форм землеробства. Поняття «smart farming» виникло як відповідь на потребу в оптимізації аграрних процесів шляхом впровадження сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, зокрема сенсорики, Інтернету речей (IoT), супутникового моніторингу, великих даних і машинного навчання [1].

Історично сільське господарство пройшло кілька основних етапів розвитку. Традиційне фермерство ґрунтується на емпіричних знаннях, фізичній праці та обмеженому використанні техніки. Точне фермерство (precision agriculture), що набуло розвитку у 1990-х роках, передбачає використання ГІС-технологій, GPS-навігації та простих систем збору даних для точного внесення добрив і засобів захисту рослин [2]. У свою чергу, розумне фермерство є більш комплексним підходом, який охоплює не лише точність дій, але й автоматизацію, автономність рішень, хмарну обробку даних та використання штучного інтелекту для прогнозування і керування всією агровиробничою системою [3].

У зарубіжній літературі розумне фермерство визначається як «сільське господарство нового покоління, що використовує цифрові технології для підвищення ефективності, продуктивності та сталості сільськогосподарського виробництва» [4]. Наприклад, згідно з визначенням, наведеним у звіті Європейської комісії, smart farming є «застосуванням інформаційно-комунікаційних технологій для оптимізації, моніторингу та управління процесами аграрного виробництва в режимі реального часу» [5].

В українській науковій традиції поняття «розумне фермерство» поступово входить у вжиток як синонім до «цифрового землеробства» або «інноваційного агробізнесу». Зокрема, у працях О. О. Бачинського зазначається, що smart farming – це «інформаційна парадигма ведення аграрного виробництва, яка поєднує автоматизацію, точне землеробство, цифрову трансформацію та екологічну орієнтованість господарської діяльності» [6].

Серед міжнародних концепцій, що тісно пов'язані з терміном «розумне фермерство», слід виділити Smart Agriculture, Farming 4.0 та e-Agriculture. Концепція Smart Agriculture охоплює широке коло заходів цифровізації аграрного сектору, включаючи використання кіберфізичних систем, сенсорних мереж, Big Data та IoT [7]. Farming 4.0, за аналогією з промисловою революцією 4.0, передбачає інтеграцію штучного інтелекту, автономних роботів, безпілотників та блокчейн-технологій у всі етапи аграрного виробництва [8]. Концепція e-Agriculture, запропонована FAO, фокусується на розбудові цифрової інфраструктури, електронного доступу до знань, онлайн-сервісів для фермерів та управлінських платформ [9].

Розумне фермерство ґрунтується на впровадженні комплексу високотехнологічних рішень, які забезпечують автоматизований моніторинг, оперативний аналіз та ефективне управління сільськогосподарськими процесами. Інтеграція таких технологій сприяє підвищенню продуктивності агровиробництва, зменшенню витрат ресурсів, підвищенню точності прийняття управлінських рішень і досягненню сталого розвитку аграрного сектору. Загальні компоненти розумного фермерства представлені на рис. 1.1.

Одним із ключових технологічних компонентів є Інтернет речей (IoT) – розподілена сенсорна інфраструктура, яка дає змогу здійснювати безперервний збір даних у реальному часі. До таких даних належать показники температури та вологості ґрунту, освітленості, швидкості вітру, рівня рН, концентрації добрив тощо. Зібрана інформація автоматично передається до центральних хмарних платформ, де обробляється й використовується для прийняття рішень щодо технологічних операцій [1; 6].



Рисунок 1.1 – Компоненти розумного фермерства

Іншим важливим елементом є глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), зокрема GPS, Galileo та Běidou. Вони забезпечують високоточну геоприв'язку об'єктів і процесів у полі. Завдяки GNSS стає можливим автоматизоване керування агротехнікою, навігація сільськогосподарських машин, створення карт продуктивності, зонування полів, а також моніторинг і контроль технологічних маршрутів [2].

Важливу роль у візуальному моніторингу стану агроєкосистем відіграють супутникові знімки та безпілотні літальні апарати (БПЛА). Ці інструменти дистанційного зондування земної поверхні забезпечують отримання високоякісних зображень, що використовуються для виявлення стресових зон, визначення фаз росту культур та розрахунку спектральних індексів – NDVI, GNDVI, SAVI тощо [10; 11; 14].

Уся зібрана інформація надходить до хмарних сховищ та обробляється за допомогою розподілених обчислювальних потужностей. Хмарні технології дозволяють масштабувати інфраструктуру, забезпечують централізований доступ до агроданих, синхронізацію з різними сенсорними пристроями та інтеграцію даних у рамках єдиної платформи [4; 12].

Особливе значення у прийнятті рішень відіграє аналітика великих даних та машинне навчання. Використання алгоритмів класифікації, регресії, нейронних мереж і кластеризації дозволяє проводити інтелектуальний аналіз даних,

прогнозувати врожайність, виявляти аномальні відхилення, оптимізувати режими поливу, обробки та удобрення [3; 5].

Завершальним компонентом інтеграційної цифрової екосистеми є програмне забезпечення для управління агровиробництвом (FMS – Farm Management Systems). Такі системи акумулюють усі елементи розумного фермерства, надаючи користувачу засоби для планування посівних кампаній, обліку використаних ресурсів, генерування статистичних звітів, контролю за витратами та впровадження рішень на основі аналітики даних [6; 13].

Інтеграція технологій розумного фермерства відкриває нові можливості для підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва за рахунок автоматизації, персоналізації та цифровізації управлінських процесів. Серед ключових переваг впровадження smart farming можна виокремити економічні, екологічні та технологічні аспекти. По-перше, застосування IoT-сенсорів, точного дозування добрив, автоматизованих систем поливу та контролю стану культур дозволяє суттєво зменшити витрати на ресурси – воду, паливо, хімікати. За даними досліджень Європейської комісії, завдяки впровадженню цифрових рішень аграрні підприємства можуть зменшити витрати на 10–25% залежно від рівня автоматизації [5].

По-друге, технології розумного фермерства сприяють підвищенню продуктивності завдяки ранньому виявленню ризиків (стресових зон, дефіциту поживних речовин, шкідників), адаптивному внесенню ресурсів та постійному моніторингу стану посівів [1; 14]. Такі рішення дають змогу досягти стабільного зростання врожайності на 15-30% [12].

Крім того, цифрові системи агромоніторингу сприяють формуванню екологічно сталого виробництва, оскільки дозволяють скоротити надмірне використання хімічних препаратів, мінімізувати навантаження на ґрунт і водні ресурси, а також підвищити рівень біорізноманіття в агроландшафтах [3; 14].

Завдяки можливостям прогнозовної аналітики на основі великих даних, системи smart farming забезпечують прогнозованість виробництва, даючи

можливість заздалегідь виявляти загрози (засуха, заморозки, спалахи хвороб), зменшуючи таким чином ризику [5; 12].

Також важливим аспектом є точне управління якістю продукції: за допомогою цифрових інструментів можна контролювати параметри якості врожаю, забезпечувати простежуваність та відповідність стандартам, що відкриває нові ринки збуту [6].

Зведену характеристику основних переваг та перешкод наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та перешкоди впровадження технологій розумного фермерства

№	Категорія	Переваги Smart Farming	Перешкоди в Україні
1	Економіка	Зменшення витрат на воду, паливо, добрива [5]	Відсутність фінансових стимулів для цифровізації [15]
2	Виробничий процес	Підвищення продуктивності, зростання врожайності [1; 12]	Низький рівень ІТ-грамотності у фермерів [6]
3	Екологія	Скорочення хімічного навантаження, ресурсозбереження [3; 14]	Відсутність державної підтримки цифрових агроініціатив [15]
4	Управління ризиками	Прогнозування загроз (засухи, шкідники), зниження збитків [5; 12]	Обмежена інфраструктура (інтернет, електрика) у сільських регіонах [14]
5	Якість продукції	Контроль параметрів якості, простежуваність [6]	Слабке технічне оснащення малих господарств [14]

Однією з головних проблем залишається низький рівень цифровізації аграрного сектору, особливо серед малих та середніх фермерських господарств, де рівень доступу до інтернету, сенсорного обладнання та сучасної техніки залишається обмеженим [14; 15].

Важливою перепоною є відсутність фінансових механізмів, зокрема державних грантів, пільгового кредитування чи податкових стимулів для модернізації фермерських господарств. У більшості випадків закупівля обладнання, розроблення програмного забезпечення чи підключення до хмарних сервісів виявляються економічно недосяжними для дрібного виробника [15].

Окрему проблему становить низький рівень цифрових і технічних компетенцій фермерів, що ускладнює впровадження складних інформаційно-аналітичних систем без залучення сторонніх ІТ-фахівців [6].

Також в Україні відсутня системна державна політика щодо підтримки цифрової трансформації агросектору. Державні програми, що стосуються цифрової економіки, не мають чіткого сегменту, присвяченого саме сільському господарству, а наявні ініціативи мають фрагментарний або експериментальний характер [15].

1.2 Огляд існуючих систем розумного фермерства

На сучасному етапі розвитку аграрної галузі спостерігається активне впровадження цифрових платформ, що поєднують технології ІоТ, супутникового моніторингу, обробки великих даних та штучного інтелекту. Нижче наведено огляд чотирьох провідних систем розумного фермерства, які мають широкий функціонал і застосовуються в різних регіонах світу.

Climate FieldView – одна з провідних платформ агроаналітики, що забезпечує фермерам інструменти для збору, збереження та візуалізації даних про стан полів, зокрема на основі супутникових знімків та даних з техніки. Система дає змогу створювати карти врожайності, аналізувати ефективність технологічних операцій і здійснювати зонування полів [16].

Платформа інтегрується з сільськогосподарськими машинами, надаючи фермерам доступ до даних у реальному часі через мобільний застосунок або веб-інтерфейс. На рис. 1.2 зображено головну сторінку сайту Climate FieldView з гаслом, що акцентує на прийнятті рішень, базованих на даних.

Цифровий сервіс Operations Center від компанії John Deere орієнтований на моніторинг, управління та планування польових робіт за допомогою інтеграції з агротехнікою цього бренду. Платформа забезпечує аналіз телеметричних даних, планування маршрутів, дистанційне налаштування техніки та формування точних карт завдань [17].

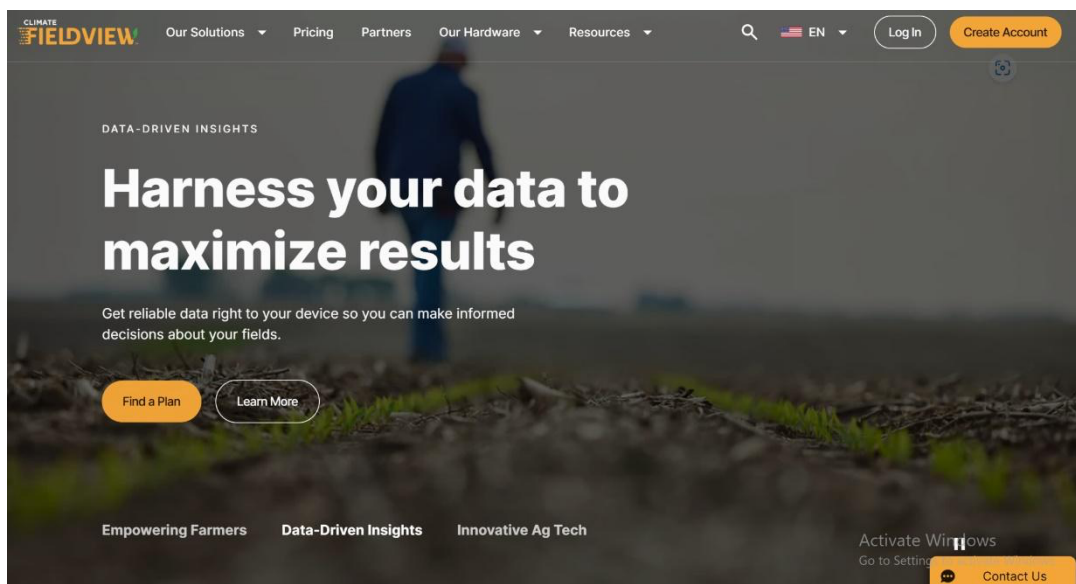


Рисунок 1.2 – Інтерфейс платформи Climate FieldView [16]

Інтерфейс програми підтримує візуалізацію операцій на полі, перегляд статистики використання ресурсів, а також передачу даних до інших агросервісів. На рис. 1.3 показано українську версію сайту, яка підкреслює зручність управління через смартфон.

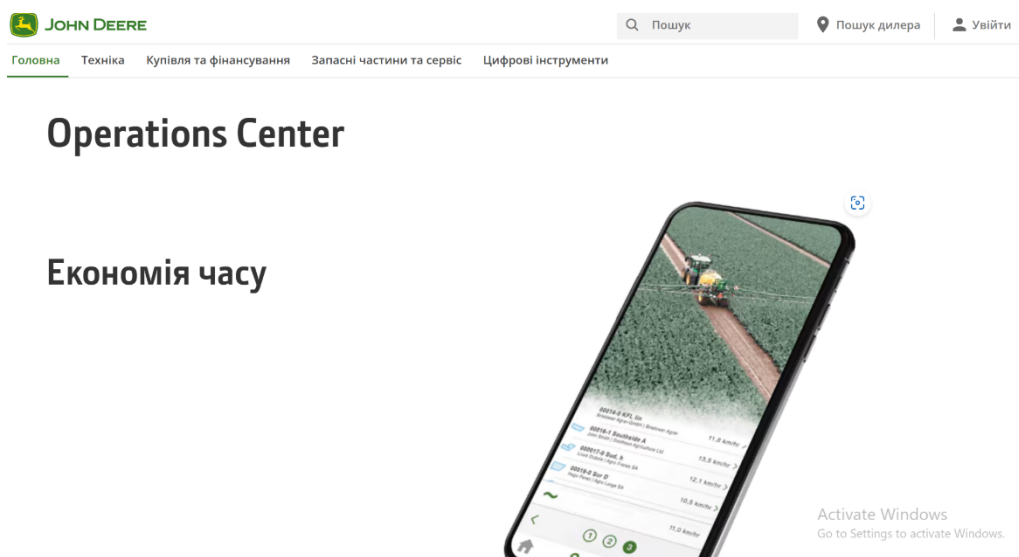


Рисунок 1.3 – Сервіс John Deere Operations Center для агромоніторингу [17]

Платформа StopX спеціалізується на управлінні водними ресурсами, агрохімічному аналізі ґрунтів і наданні рекомендацій щодо поливу та удобрення

на основі IoT-сенсорів і супутникових даних. Унікальність системи полягає у поєднанні апаратного та програмного забезпечення, що дозволяє здійснювати агрономічний аналіз ґрунтів у режимі реального часу [18].

Платформа орієнтована на фермерів, агрохолдинги та дослідницькі установи, надаючи персоналізовані звіти і попередження. На рис. 1.4 наведено головну сторінку платформи, яка позиціонується як «повна цифрова агрономічна система».

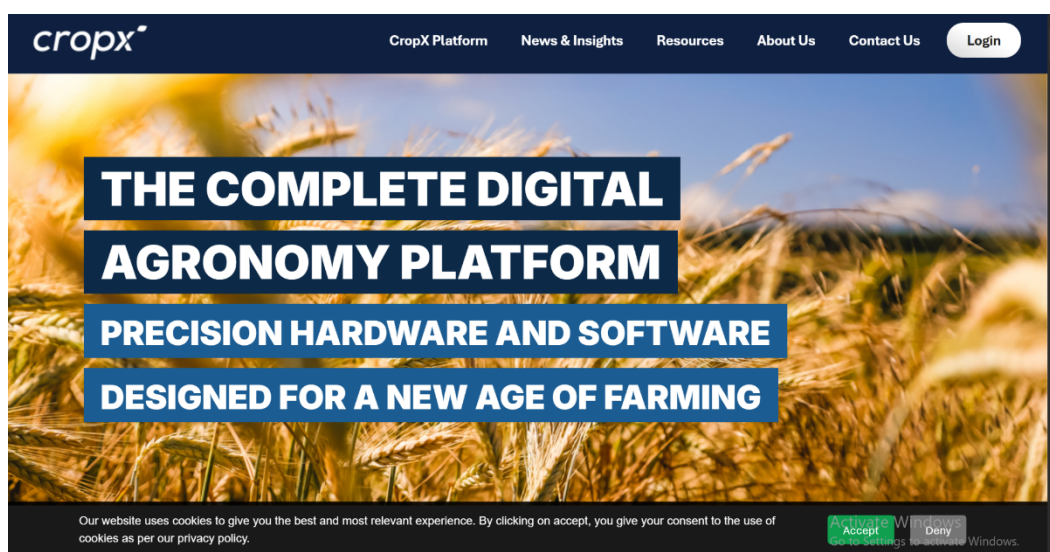


Рисунок 1.4 – Головна сторінка цифрової платформи CropX [18]

EOSDA Crop Monitoring – українська супутникова платформа для аналізу стану сільськогосподарських полів. Система дозволяє стежити за вегетаційними індексами (NDVI, NDRE), погодними ризиками, формувати карти диференційованого внесення добрив, вести журнал робіт та керувати агротехнологічними процесами [19].

Завдяки інтеграції з українськими кліматичними моделями та високочастотними супутниковими знімками, платформа адаптована до потреб вітчизняних фермерів. На рис. 1.5 зображено інтерфейс EOS Crop Monitoring з візуалізацією функціональних блоків платформи.

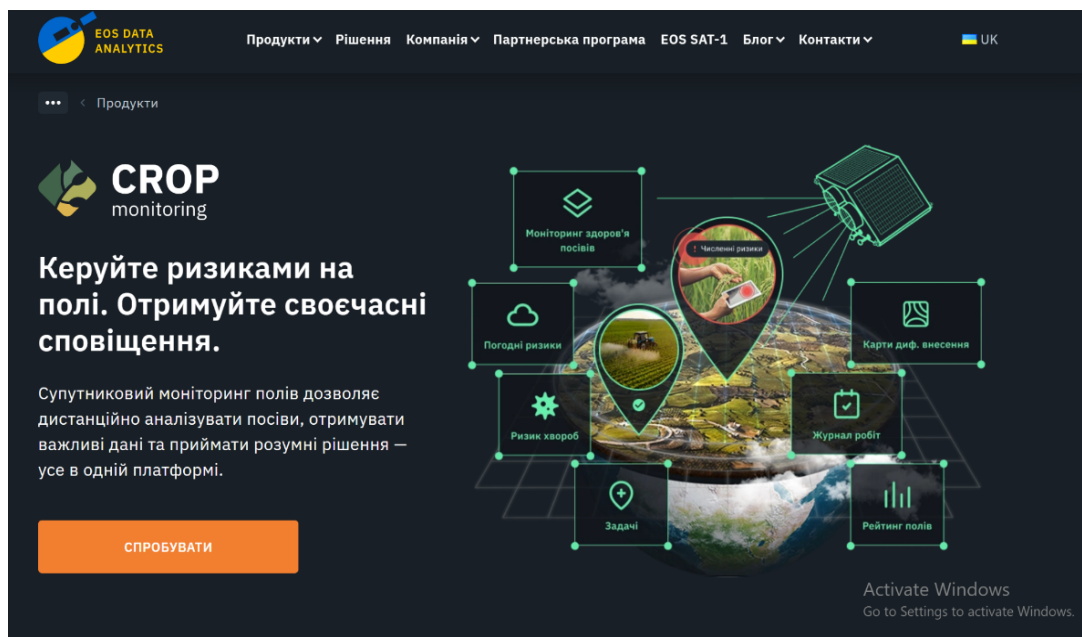


Рисунок 1.5 – Інтерфейс української платформи EOSDA Crop Monitoring [19]

Узагальнюючи попередній матеріал, доцільно порівняти ключові характеристики проаналізованих платформ розумного фермерства з прототипом системи, яка розробляється у межах даного дослідження. Критеріями порівняння обрано: тип основних даних, наявність супутникової аналітики, підтримку IoT-сенсорів, функціональність управління полями, можливості машинного навчання, локалізацію інтерфейсу та наявність підтримки українських умов. Порівняльна таблиця 1.2 представлена далі.

Проведений порівняльний аналіз свідчить, що сучасні системи розумного фермерства мають широкий функціонал, але здебільшого орієнтовані на західні ринки та великі агропідприємства з відповідною технічною базою. Натомість запропонована в межах цієї роботи система акцентує на доступності, підтримці української мови, простоті інтеграції та орієнтації на аналіз супутникових знімків із використанням машинного навчання (SVM, нейромережі). Вона забезпечує базову автоматизовану інтерпретацію стану ґрунтів без потреби у дорогих сенсорах або спеціалізованій техніці, що робить її перспективною для застосування в умовах малого та середнього фермерства в Україні.

Таблиця 1.2 – Порівняння функціональності систем розумного фермерства

№	Назва системи	Супутниковий моніторинг	Підтримка IoT	Управління полями	Машинне навчання	Локалізація	Підтримка України	Особливості
1	Climate Field-View	✓	✓	✓	✗		Обмежено	Акцент на картах посіву, інтерфейс з технікою Bayer
2	John Deere Operations Center	✓	✓	✓	✗	 / 	✓	Інтеграція з технікою John Deere
3	CropX	✓	✓	✓	✓		Частково	Аналіз ґрунтів, сенсори, оптимізація поливу
4	EOSDA Crop Monitoring	✓	✗	✓	✓		✓	Вітчизняна система, NDVI, карти ризиків
5	Власна система (проєкт)	✓	✗	✓	✓		✓	Аналіз NDVI/BSI/контрасту, HTML-звіт, GUI, SVM/NN

1.3 Програмні та апаратні засоби, що використовуються в агротехнологіях

Інформаційно-технологічне забезпечення сучасного аграрного виробництва базується на інтеграції спеціалізованих програмних та апаратних засобів, які забезпечують цифровізацію всіх етапів польових робіт – від планування посівів до аналізу врожайності. У контексті розумного фермерства (smart farming) взаємодія між програмним забезпеченням і фізичними пристроями створює цілісну систему прийняття рішень на основі великих даних.

До основних видів програмного забезпечення, що застосовуються в агротехнологіях, належать:

- платформи агромоніторингу (наприклад, EOSDA Crop Monitoring, OneSoil, Climate FieldView), які забезпечують обробку супутникових знімків, розрахунок вегетаційних індексів (NDVI, NDRE, SAVI), зонування полів і прогнозування ризиків [16; 19; 20];

- системи управління фермерськими господарствами (FMS – Farm Management Systems), зокрема AgroOffice, AgroPilot, AgroCont, які дозволяють вести облік ресурсів, планувати агрономічні операції, формувати аграрну документацію та інтегрувати телеметричні дані з техніки [13; 21];

- інструменти аналізу даних – це ПЗ, засноване на хмарних платформах (Google Earth Engine, IBM PAIRS), що забезпечує автоматизовану обробку зображень, агроаналітику, машинне навчання (SVM, кластеризація, неймережі) та візуалізацію результатів [5; 22];

- геоінформаційні системи (ГІС), як-от QGIS, ArcGIS, які широко застосовуються для просторового моделювання агроландшафтів, побудови карт полів, планування меліоративних заходів, аналізу ґрунтів [23].

Такі системи можуть бути як веборієнтованими (онлайн доступ через браузер), так і локальними (настільні програми, мобільні додатки), що визначає рівень гнучкості і масштабованості для користувача.

Апаратна складова цифрового землеробства включає широкий спектр сенсорних, навігаційних та виконавчих пристроїв:

- IoT-сенсори для вимірювання вологості ґрунту, температури, кислотності (рН), електропровідності, вітру, освітленості тощо. Вони використовуються для створення розподілених систем моніторингу в режимі реального часу [1; 18];

- GNSS-приймачі (GPS, Galileo, ГЛОНАСС), які забезпечують точне позиціонування сільськогосподарської техніки, автоматизацію руху, створення карт продуктивності полів, а також контроль траєкторії обробки [2];

– БПЛА, які використовуються для дистанційного зондування полів, виявлення стресових зон, формування індексів вегетації, проведення фотограмметрії та тепловізійного аналізу [3; 11; 14];

– агротехніка з цифровим контролем – це трактори, обприскувачі, сівалки з функцією автоматичного управління, що інтегруються з системами точного землеробства (Precision Ag) через ISOBUS-протоколи [17; 21].

Слід також зазначити поширення власних апаратно-програмних рішень у малих фермерських господарствах, зокрема, на основі Raspberry Pi, Arduino та LoRaWAN-модулів, що дає змогу створювати економічно доступні сенсорні системи в умовах обмежених ресурсів [24].

Отже, ефективне функціонування сучасних агротехнологій забезпечується комплексним поєднанням програмної аналітики, телеметрії, супутникових знімків та апаратного забезпечення на основі IoT і навігаційних систем. Така інтеграція дозволяє автоматизувати агровиробництво, оптимізувати використання ресурсів та формувати нову модель аграрного управління, орієнтовану на дані.

1.4 Постановка задачі дослідження

Проблема оцінки стану ґрунтів є однією з ключових у сфері аграрного природокористування, оскільки безпосередньо впливає на врожайність, ефективність сільськогосподарського виробництва та стійкість екосистем. В умовах інтенсивної експлуатації земель, змін клімату та обмежених водних ресурсів зростає потреба у точному та своєчасному визначенні фізико-хімічного стану ґрунтів, що є основою для прийняття обґрунтованих агротехнологічних рішень.

Сучасні методи моніторингу ґрунтів часто базуються на використанні супутникових знімків у поєднанні з математичними моделями, спектральними індексами (NDVI, BSI, Brightness Index, Dry Index) та алгоритмами машинного

навчання. Перевага таких рішень полягає у їх масштабованості, доступності та відсутності потреби у прямому фізичному зондуванні території.

У межах цього дослідження ставиться завдання розробити програмну систему, що дає можливість здійснювати автоматизовану класифікацію стану ґрунтів на основі супутникових знімків з урахуванням ряду візуальних і статистичних характеристик зображення. В основу системи покладається використання методів обробки зображень, індексного аналізу спектральних каналів та алгоритмів штучного інтелекту для підвищення точності класифікації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасні технології класифікації стану ґрунтів у контексті точного землеробства;
- дослідити можливості використання супутникових знімків у поєднанні з індексами NDVI, BSI, Brightness Index, Dry Index;
- розробити математичну модель, що враховує яскравісні та структурні характеристики зображення (контраст, ентропія, гістограма пікселів, відсоток темних/світлих зон);
- впровадити і протестувати алгоритми машинного навчання;
- забезпечити модульну архітектуру системи з можливістю подальшої адаптації та масштабування.

Очікуваним результатом є створення надійного програмного прототипу, що забезпечує ефективну класифікацію стану ґрунтів за допомогою супутникових даних із використанням індексного аналізу, статистичних метрик і алгоритмів штучного інтелекту, з подальшою можливістю практичного використання в аграрному секторі для прийняття рішень щодо поливу, обробки ґрунту чи ротації культур.

Висновки до першого розділу

У першому розділі було здійснено ґрунтовний аналіз теоретичних засад концепції розумного фермерства в умовах цифрової трансформації аграрного

сектору. Встановлено, що smart farming є логічним етапом еволюції сільськогосподарського виробництва, що поєднує технології Інтернету речей, супутникового моніторингу, великих даних, хмарних обчислень і штучного інтелекту для забезпечення високоточного, адаптивного та сталого управління агровиробничими процесами.

Розглянуто основні компоненти технологічної екосистеми розумного фермерства, включаючи IoT-сенсори, GNSS-навігацію, безпілотні літальні апарати, супутникову аналітику, хмарні платформи та програмне забезпечення типу FMS. Акцент зроблено на важливості інтеграції цих технологій у єдиний інформаційний контур, що забезпечує збирання, обробку й аналітику аграрних даних у режимі реального часу.

Наведено характеристику провідних світових цифрових платформ для агромоніторингу, таких як Climate FieldView, John Deere Operations Center, CropX та EOSDA Crop Monitoring. Проведено їх порівняльний аналіз із власним програмним прототипом, розробка якого передбачається у межах цього дослідження. Показано, що більшість існуючих систем орієнтовані на великі агропідприємства, тоді як вітчизняна система спрямована на забезпечення доступності для малих і середніх фермерських господарств в Україні.

Проаналізовано програмні та апаратні засоби, що забезпечують цифровізацію аграрного виробництва, а також окреслено основні проблеми впровадження smart farming у національному контексті. До ключових перешкод належать низький рівень цифровізації агросектору, обмежений доступ до сучасної техніки, відсутність фінансових механізмів підтримки та дефіцит IT-компетенцій серед фермерів.

Постановка задачі дослідження окреслила основні напрями роботи, серед яких – розробка програмної системи для автоматизованої класифікації стану ґрунтів на основі супутникових знімків та методів машинного навчання. Таким чином, підґрунтя, закладене у цьому розділі, є теоретичною та концептуальною основою для подальшої розробки прототипу системи та реалізації практичної частини дослідження.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Аналіз вимог до програмного забезпечення, що розробляється

У сучасних умовах цифрової трансформації аграрного сектору ключову роль відіграють інформаційні системи, орієнтовані на автоматизацію процесів моніторингу, аналізу та прийняття рішень. Розумне фермерство (smart farming) передбачає інтеграцію цифрових технологій, зокрема супутникового моніторингу, сенсорних мереж, алгоритмів штучного інтелекту та аналітики великих даних, для забезпечення ефективного управління агровиробничими процесами. Однією з критичних складових цієї концепції є системи оцінки стану ґрунтів, оскільки саме ґрунтовий покрив є базовим ресурсом сільськогосподарського виробництва, що визначає врожайність, ефективність використання добрив, поливу та інших технологічних операцій.

Впровадження програмного забезпечення в екосистему розумного фермерства потребує ретельного визначення вимог, які враховують як специфіку аграрної галузі, так і технічні аспекти цифрових рішень. Система автоматизованої класифікації стану ґрунтів на основі супутникових знімків має не лише відповідати загальним принципам smart farming (точність, оперативність, ефективність ресурсокористування), але й бути адаптивною до умов конкретного регіону, доступною для малих та середніх фермерських господарств та інтегруватися в існуючі цифрові платформи .

З точки зору інженерії програмного забезпечення, процес розробки подібних систем починається з формалізації вимог, що визначають функціональні можливості, якісні характеристики та технічні обмеження продукту. Відповідно до стандартів ISO/IEC 25010 та IEEE 830-1998, вимоги класифікуються на три основні групи:

- функціональні вимоги – описують основні сервіси та функції, які повинна виконувати система для досягнення цілей користувача;

– нефункціональні вимоги – встановлюють критерії якості, що визначають продуктивність, надійність, безпеку, зручність використання та інші атрибути системи;

– технічні вимоги – окреслюють необхідні апаратні ресурси, програмне середовище, сумісність та інші інфраструктурні аспекти для забезпечення працездатності рішення.

Чітке формування цих вимог є критичним етапом, оскільки забезпечує:

– відповідність функціоналу очікуванням кінцевих користувачів (фермерів, агрономів, аналітиків).

– гарантію стабільної роботи в умовах обмежених ресурсів сільської інфраструктури;

– можливість масштабування системи та її інтеграції з іншими аграрними платформами та сервісами;

– забезпечення високої точності класифікації на основі сучасних методів машинного навчання та індексного аналізу супутникових даних.

Функціональні вимоги визначають основні функції, які має виконувати система для досягнення поставленої мети. Вони орієнтовані на опис поведінки системи в типових сценаріях використання та визначають взаємодію користувача з програмним забезпеченням. Основні функціональні вимоги до розроблюваної системи наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Функціональні вимоги до програмного забезпечення

№	Вимога	Опис
1	Завантаження супутникових знімків	Підтримка форматів PNG, JPEG, TIFF для імпорту зображень
2	Розрахунок спектральних індексів	Автоматизоване обчислення NDVI, BSI, Brightness Index
3	Аналіз статистичних характеристик	Визначення контрасту, ентропії, яскравості, відсотку темних/світлих пікселів
4	Класифікація стану ґрунтів	Використання алгоритмів SVM та нейронних мереж для багатокласової класифікації
5	Візуалізація результатів	Генерація графіків, гістограм та відображення класифікаційних міток

Продовження таблиці 2.1

6	Формування HTML-звіту	Автоматичне створення звіту з результатами аналізу та класифікації
7	Збереження та експорт результатів	Підтримка експорту у формати CSV, PDF
8	Модуль налаштувань	Можливість вибору алгоритму класифікації, параметрів аналізу
9	Локалізація інтерфейсу	Підтримка української та англійської мов

Нефункціональні вимоги визначають якісні характеристики програмного забезпечення, що впливають на його продуктивність, надійність, зручність використання та інші аспекти, які не пов'язані безпосередньо з виконанням функцій. Основні нефункціональні вимоги наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Нефункціональні вимоги до програмного забезпечення

№	Категорія якості	Вимога
1	Продуктивність (Performance efficiency)	Час відповіді на запит користувача не перевищує 1 секунди при обробці зображення до 5 Мп.
2	Надійність (Reliability)	Безперервна робота протягом щонайменше 8 годин без збоїв або перезапуску.
3	Зручність використання (Usability)	Локалізація інтерфейсу українською та англійською мовами; наявність інтуїтивної навігації та доступності.
4	Сумісність (Compatibility)	Підтримка запуску в середовищах Windows 10/11 та Linux Ubuntu 20.04+ без зміни системних налаштувань.
5	Безпека (Security)	Відсутність обов'язкових підключень до Інтернету; зберігання конфігураційних даних у захищеному форматі.
6	Портативність (Portability)	Можливість запуску на декількох типах пристроїв без повторної інсталяції або адаптації.
7	Обслуговуваність (Maintainability)	Модульна структура коду, наявність документації та коментарів до кожного компоненту.
8	Масштабованість (Scalability)	Підтримка розширення функціональності шляхом додавання нових модулів без зміни базової архітектури.

Технічні вимоги визначають мінімальні апаратні та програмні ресурси, необхідні для коректної роботи програмного забезпечення, а також використовувані інструменти та технології розробки.

Таблиця 2.3 – Технічні вимоги до програмного забезпечення

№	Категорія	Вимога
1	Процесор	Мінімум: 2-ядерний CPU, Рекомендовано: 4-ядерний CPU
2	Оперативна пам'ять	Мінімум: 4 ГБ, Рекомендовано: 8 ГБ
3	Дисковий простір	Вільне місце на диску: мінімум 500 МБ
4	Операційна система	Windows 10/11, Linux Ubuntu 20.04+
5	Програмне середовище	Python 3.10+, бібліотеки: OpenCV, NumPy, scikit-learn, PyQt6, Matplotlib
6	Дисплей	Роздільна здатність не менше 1366x768
7	Інше	Відсутність обов'язкової потреби в підключенні до Інтернету

Виконаний аналіз вимог до програмного забезпечення дав змогу сформуванню комплексний перелік функціональних, нефункціональних та технічних характеристик, які визначають архітектуру та основні параметри системи. Визначені вимоги забезпечують реалізацію ключових функцій автоматизованої класифікації стану ґрунтів на основі супутникових знімків із застосуванням методів машинного навчання та індексного аналізу.

Особливу увагу приділено локалізації, автономності роботи без потреби у зовнішніх сервісах, а також адаптації системи для умов малого та середнього фермерства України. Визначені вимоги створюють основу для подальшого етапу проектування програмної архітектури та вибору відповідних інструментальних засобів.

2.2 Моделювання предметної області

Процес створення програмного забезпечення для систем розумного фермерства неможливий без попереднього формалізованого опису предметної

області. Моделювання відіграє ключову роль у розумінні структури майбутньої системи, її функціональних можливостей, взаємодії користувачів із програмним продуктом та організації обробки даних. Саме через побудову моделей розробник отримує узгоджене бачення того, як різні компоненти програмного забезпечення співпрацюють між собою для досягнення кінцевої мети – забезпечення точного, швидкого та зручного аналізу стану ґрунтів на основі супутникових знімків.

Для опису предметної області даної системи класифікації ґрунтів було використано універсальний засіб – мову UML, яка дозволяє створювати як статичні (структурні), так і динамічні (поведінкові) моделі. Це дало змогу всебічно охопити як архітектуру програмного забезпечення, так і сценарії його використання.

Початковим етапом моделювання стало визначення основних дій користувачів у системі. На діаграмі варіантів використання, поданій на рис. 2.1, відображено ключові сценарії, які охоплюють увесь життєвий цикл роботи з програмним забезпеченням – від моменту завантаження супутникового знімка до отримання готових результатів класифікації.

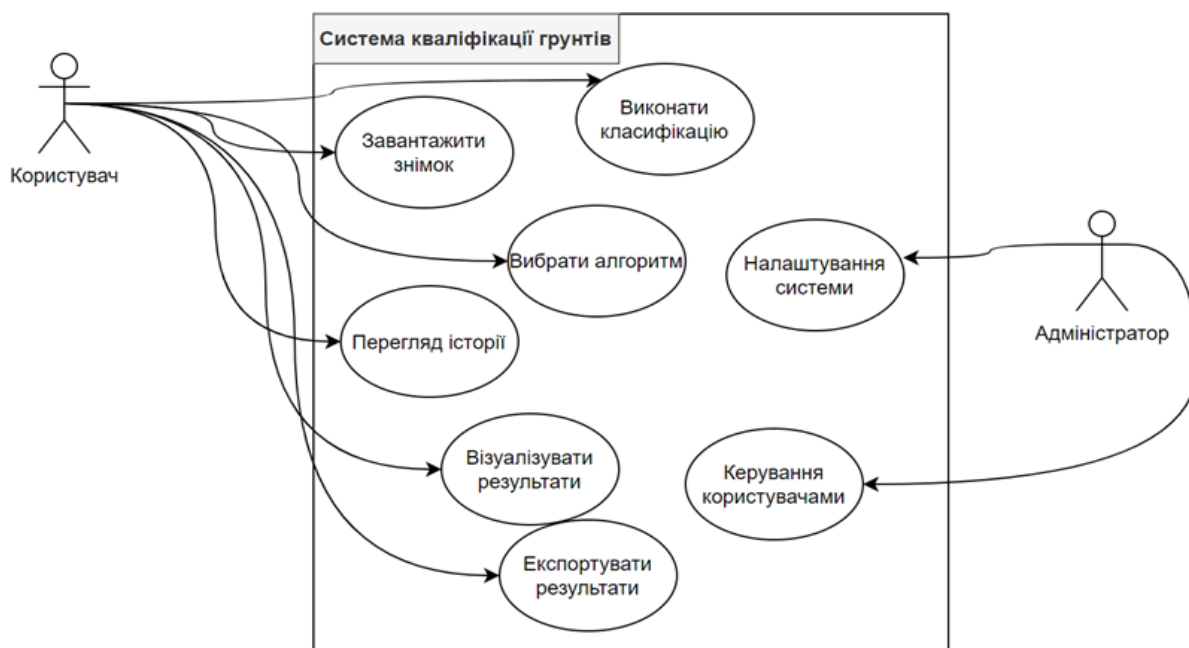


Рисунок 2.1 – Діаграма прецедентів системи кваліфікації і аналізу ґрунтів

Основним актором є Користувач, який взаємодіє із системою для виконання прикладних задач: вибір алгоритму класифікації (з урахуванням специфіки ґрунтів або мети аналізу), ініціація процесу обробки, перегляд історії виконаних операцій, візуалізація отриманих результатів та їх подальший експорт у зручному форматі.

Другим важливим учасником є Адміністратор, який відповідає за підтримку працездатності системи, управління налаштуваннями та контроль доступу користувачів. Такий поділ ролей забезпечує баланс між функціональністю для кінцевого користувача та стабільністю програмного середовища.

Ця діаграма не лише демонструє функціональні можливості системи, а й окреслює її межі, що є фундаментом для проєктування внутрішніх процесів. Для кращого розуміння порядку виконання операцій була розроблена діаграма послідовності (рис. 2.2), яка відображає типовий сценарій взаємодії користувача з модулями системи.

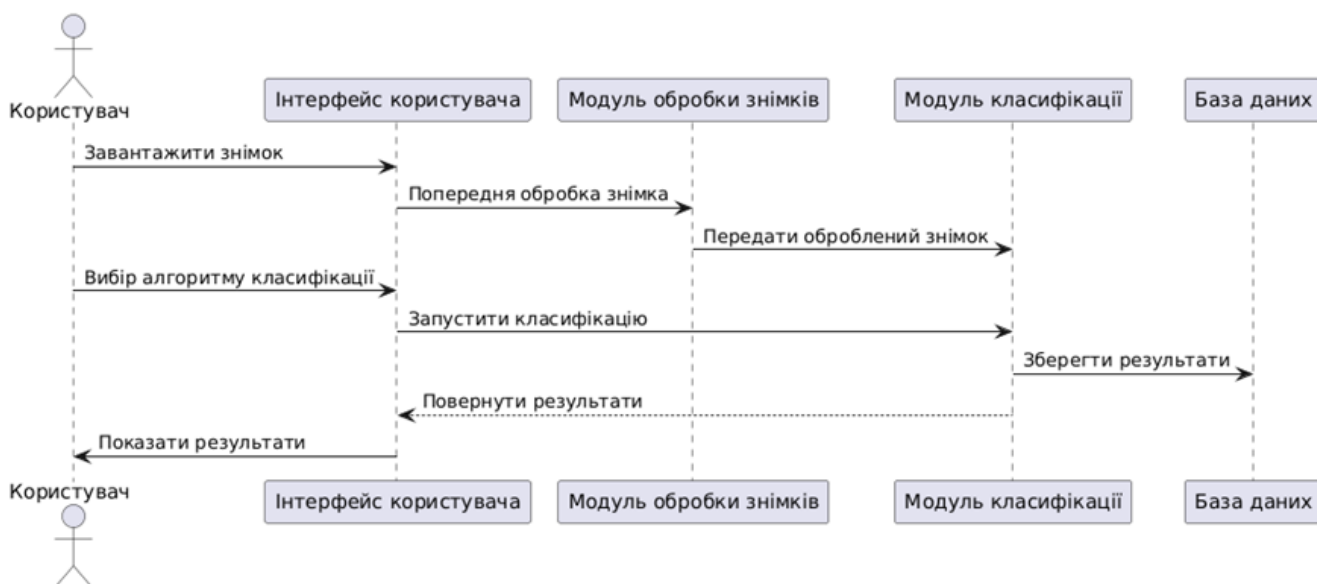


Рисунок 2.2 – Діаграма послідовності розроблювальної системи

Важливо підкреслити, що процес починається саме з інтерфейсу користувача, що гарантує простоту і доступність взаємодії навіть для осіб без спеціальної технічної підготовки. Після завантаження знімка запускається

модуль попередньої обробки, де виконується очищення, нормалізація та підготовка даних до аналітики.

Наступним кроком є передача зображення до модуля класифікації, де вже задіяні алгоритми машинного навчання. Система автоматично обирає оптимальну стратегію аналізу або діє відповідно до вибору користувача. Отримані результати не лише повертаються для візуалізації, а й зберігаються у базі даних для подальшого використання – це забезпечує історичний аналіз та можливість відстеження динаміки стану ґрунтів.

Структура даних є основою будь-якої інформаційної системи. На рис. 2.3 представлено діаграму класів, яка формалізує внутрішню організацію сутностей, що забезпечують функціонування системи класифікації ґрунтів.

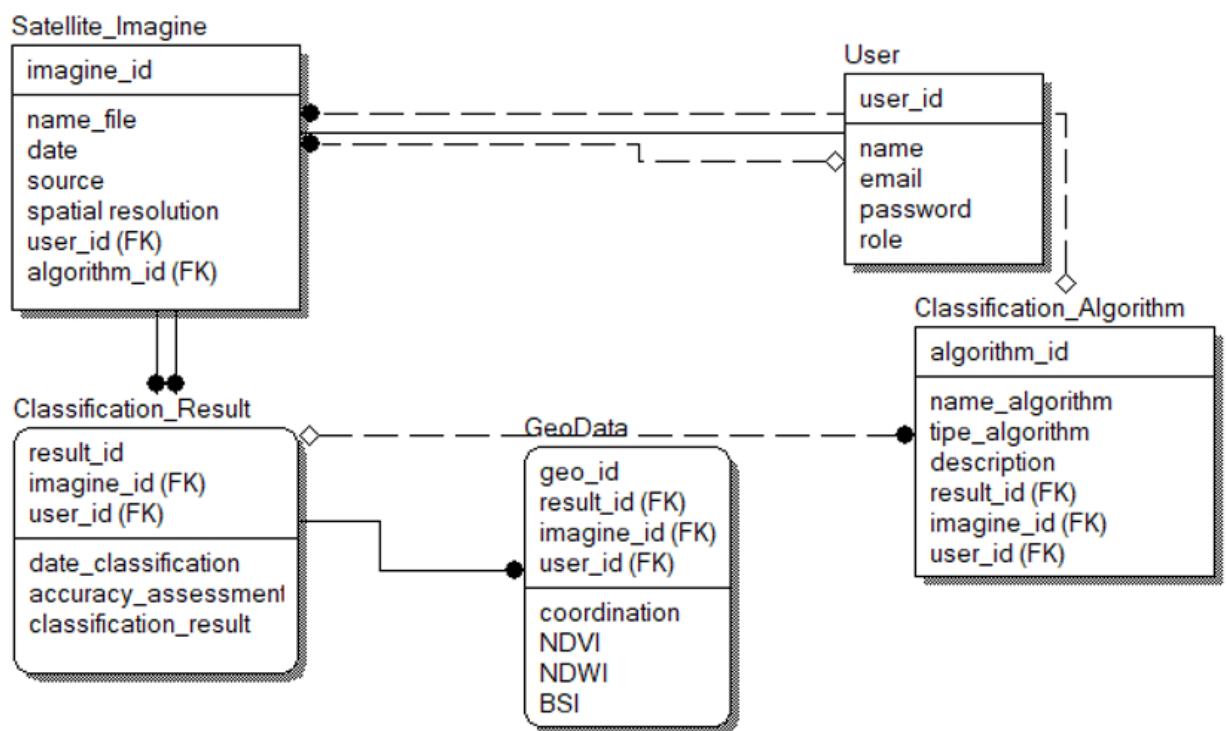


Рисунок 2.3 – Діаграма класів

Особливу увагу слід звернути на клас **Satellite_Imagine**, який акумулює всі необхідні метадані про завантажене зображення, включаючи джерело отримання, роздільну здатність і дату фіксації. З цим класом безпосередньо

пов'язаний `Classification_Result`, де зберігаються результати виконаної класифікації разом із показниками точності.

Клас `GeoData` виконує роль носія просторових характеристик та спектральних індексів, що дозволяє виконувати подальшу геоаналітику. Класи `User` та `Classification_Algorithm` забезпечують управління обліковими записами користувачів та реєстр доступних алгоритмів відповідно.

Завдяки такій структурі система стає гнучкою, масштабованою і готовою до інтеграції нових типів даних та алгоритмів без необхідності кардинальної перебудови бази даних.

Поглиблене уявлення про логіку роботи програмного забезпечення дають діаграми компонентів і пакетів (рис. 2.4 та рис. 2.5). Вони демонструють, як інформація проходить шлях від завантаження до збереження результатів.

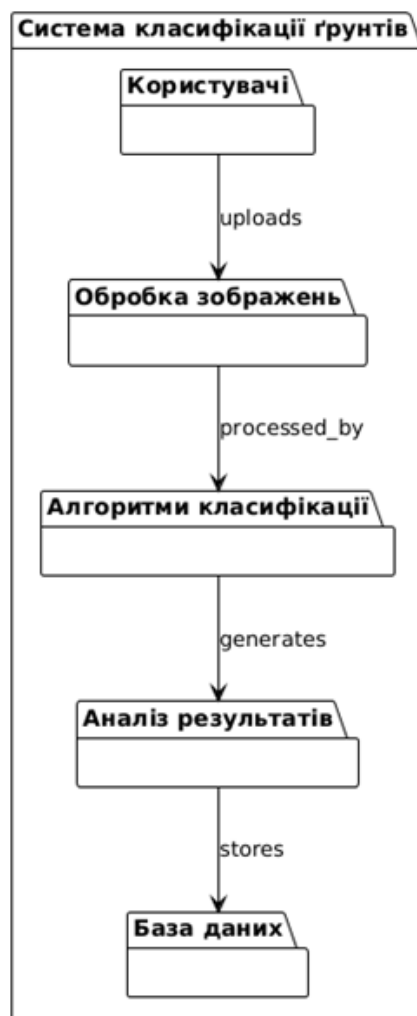


Рисунок 2.4 – Діаграма пакетів розроблювальної системи

Діаграма компонентів, відповідно, представлена на рис. 2.5. На ній чітко простежується послідовність: користувач ініціює процес, система виконує обробку, запускає алгоритми класифікації, після чого результати аналізуються і передаються до бази даних.

Діаграма пакетів деталізує це, показуючи поділ системи на функціональні блоки: інтерфейс користувача, модуль обробки зображень, класифікаційний модуль, аналітичний блок і систему зберігання даних. Використання GeoDatabase та PostgreSQL гарантує ефективну роботу з великими обсягами просторових даних.

Ця архітектура забезпечує стабільність, розширюваність та високу швидкість обробки, що критично важливо для аграрного сектору, де оперативність прийняття рішень часто впливає на економічний результат.

Здійснене моделювання предметної області дозволило побудувати цілісне бачення майбутньої системи класифікації ґрунтів, що охоплює всі рівні – від взаємодії користувача до внутрішньої логіки обробки даних та архітектури зберігання інформації. Використання UML-діаграм забезпечило прозорість проектних рішень, сприяло виявленню потенційних вузьких місць ще на етапі планування та заклало основу для ефективною реалізації і подальшої масштабованості системи. Запропонована модель демонструє гнучкість, відповідність принципам сучасного програмування та орієнтацію на практичні потреби аграрного сектору в умовах цифровізації.

2.3 Програмна реалізація проєкту

У контексті стрімкого розвитку концепції розумного фермерства, що ґрунтується на інтеграції цифрових технологій у сільськогосподарське виробництво, зростає потреба у спеціалізованих програмних рішеннях для оперативного та точного моніторингу стану агроєкосистем. Одним із ключових напрямів цифровізації агросектору є автоматизований аналіз супутникових

знімків, що дозволяє отримувати об'єктивні дані про стан ґрунтів без необхідності проведення трудомістких польових робіт.

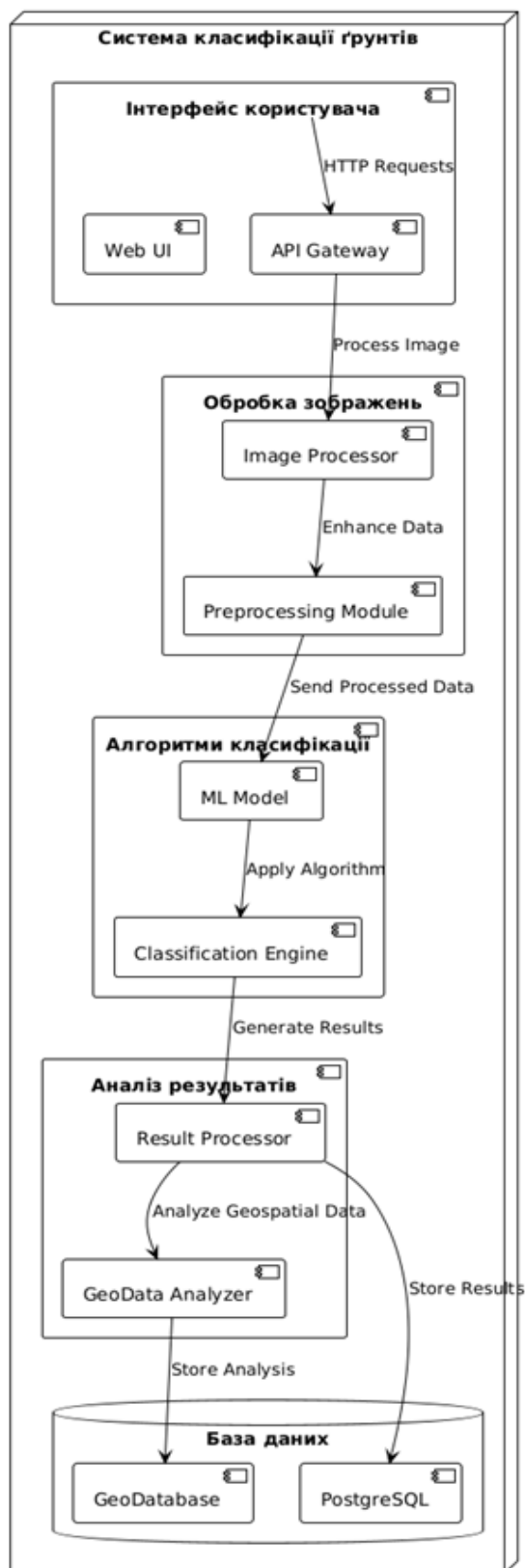


Рисунок 2.5 – Діаграма компонентів розроблювальної системи

Враховуючи складність завдань, пов'язаних із обробкою великого обсягу геопросторової інформації та застосуванням алгоритмів штучного інтелекту, розробка подібного програмного забезпечення потребує використання сучасних підходів до проєктування.

Одним із таких підходів є модульна архітектура, яка відповідає вимогам систем у сфері smart farming. Вона передбачає чіткий розподіл функціональних обов'язків між окремими логічними компонентами, кожен з яких спеціалізується на виконанні конкретної задачі – від обробки зображень до аналітики та управління даними. Така структурна організація системи забезпечує високу ступінь ізоляції модулів, що значно полегшує процеси тестування, налагодження та подальшого розвитку програмного продукту відповідно до змінних потреб агровиробництва.

Використання принципу функціональної декомпозиції дає змогу розбити складну задачу аналізу супутникових знімків на серію простіших, взаємопов'язаних підзадач. Це створює передумови для ефективного управління ресурсами системи, оптимізації обчислювальних процесів та підвищення продуктивності в умовах роботи з великими масивами даних. Крім того, така архітектура сприяє повторному використанню коду, що є критично важливим для забезпечення гнучкості при впровадженні нових алгоритмів класифікації або адаптації до інших типів вхідних даних.

У межах розробки програмного забезпечення для класифікації стану ґрунтів було реалізовано модульний підхід, де кожен компонент системи виконує вузькоспеціалізовані функції: попередня обробка супутникових знімків, застосування алгоритмів машинного навчання, генерація аналітичних звітів, організація взаємодії з користувачем через графічний інтерфейс та збереження результатів у структурованих форматах.

Центральним елементом взаємодії кінцевого користувача з системою виступає графічний інтерфейс, реалізований засобами бібліотеки PyQt6. Саме через цей інтерфейс здійснюється основний контроль над процесом обробки зображень, вибором алгоритмів машинного навчання та отриманням результатів.

Початковим етапом роботи є завантаження супутникового знімка за допомогою стандартного діалогового вікна вибору файлів, що інтегровано у клас головного вікна програми. Цей процес відображено на рис. 2.6.

```

374     def load_image(self):
375         fname, _ = QFileDialog.getOpenFileName(self, "Оберіть зображення", "", "Images (*.p
376         if fname:
377             self.image_path = fname
378             pixmap = QPixmap(fname).scaled(600, 400, Qt.AspectRatioMode.KeepAspectRatio)
379             self.label_image.setPixmap(pixmap)
380

```

Рис. 2.6 – Лістинг коду інтерфейсу завантаження супутникового знімка у графічному середовищі системи

Після імпорту файл автоматично масштабується та виводиться у віджеті для попереднього перегляду, що дозволяє користувачу переконатися в коректності вибору вхідних даних перед подальшою обробкою.

Наступним кроком є ініціалізація процедури класифікації стану ґрунту. Відповідний виклик здійснюється через універсальний інтерфейс, що реалізує логіку вибору алгоритму машинного навчання залежно від заданих параметрів. Система підтримує динамічне перемикання між двома основними підходами: класичним методом опорних векторів (SVM) та моделлю глибокого навчання на основі фреймворку Keras. Імплементация цього процесу наведена на рис. 2.7.

```

def predict_soil_condition(image_path: str):
    """
    Класифікує стан ґрунту, використовуючи вибрану модель (SVM або Keras).
    :param image_path: Шлях до зображення
    :return: (predicted_label, probabilities, class_names)
    """
    if not os.path.exists(image_path):
        raise FileNotFoundError(f"✘ Зображення не знайдено: {image_path}")
    root_dir = os.path.abspath(os.path.join(os.path.dirname(__file__), "..", ".."))

    if USE_KERAS_MODEL:
        model_path = os.path.join(root_dir, KERAS_MODEL_PATH)
        return predict_with_keras_model(image_path, model_path)
    else:
        model_path = os.path.join(root_dir, SVM_MODEL_PATH)
        return predict_with_svm_model(image_path, model_path)

```

Рисунок 2.7 – Лістинг коду структури виклику універсального інтерфейсу класифікації

Методика класифікації за допомогою SVM передбачає навчання моделі на структурованих наборах даних, де зображення групуються у каталоги відповідно до класів ґрунтів. Така організація тренувального датасету дозволяє алгоритму ефективно формувати гіперплощини для поділу класів. Приклад структури навчальних даних представлено на рис. 2.8.

```
71 model = make_pipeline(*steps: StandardScaler(), SVC(kernel='linear', probability=True))
72 model.fit(X_train, y_train)
```

Рисунок 2.8 – Лістинг коду організації навчального набору для SVM-класифікатора

У випадку використання нейронних мереж задіюється заздалегідь навчена модель, інтегрована через Keras. Цей підхід дає змогу забезпечити високу точність класифікації за рахунок глибокої обробки характеристик зображень. Модель працює з нормалізованими знімками у кольоровому просторі RGB. Архітектурна схема взаємодії з моделлю показана на рис. 2.9.

```
17 model = tf.keras.models.load_model(model_path)
18 image = preprocess_image(image_path, target_size=(128, 128))
19 image_batch = np.expand_dims(image, axis=0)
```

Рисунок 2.9 – Лістинг коду використання глибокого навчання у середовищі Keras

Важливою складовою попереднього етапу перед класифікацією є обробка вхідного зображення для виділення ключових візуальних ознак. Система автоматично обчислює такі метрики, як середня яскравість, контрастність, кількість темних і світлих зон, а також ентропію, що характеризує рівень інформаційного наповнення зображення. Для цих операцій використовуються бібліотеки OpenCV, NumPy та SciPy, які забезпечують високопродуктивну роботу з візуальними даними. Алгоритмічний процес представлено на рис. 2.10.

```
# Базові метрики
mean = np.mean(image)
std = np.std(image)
dark_pixels = np.sum(image < 50) / image.size * 100
bright_pixels = np.sum(image > 200) / image.size * 100
```

Рисунок 2.10 – Лістинг коду обчислення візуальних метрик із використанням OpenCV, NumPy та SciPy

Результати аналізу візуалізуються у вигляді гістограми розподілу яскравості, яка зберігається у тимчасовий файл і відображається безпосередньо у графічному інтерфейсі користувача. Це дозволяє оперативно оцінити структуру зображення та виявити потенційні аномалії. Приклад реалізації подано на рис. 2.11.

```
plt.hist(image.ravel(), bins=256, range=(0, 256), color='skyblue', alpha=0.7)
plt.title("Гістограма яскравості")
plt.xlabel("Яскравість")
plt.ylabel("Кількість пікселів")
plt.tight_layout()
plt.savefig(tmpfile.name)
hist_img_path = tmpfile.name
plt.close()
```

Рисунок 2.11 – Лістинг коду побудови та відображення гістограми яскравості у GUI

Фінальним етапом є формування звіту, який включає результати класифікації, супутниковий знімок та аналітичні метрики. Система генерує HTML-документ із вбудованими графічними елементами (через кодування у форматі base64), що дає можливість зберігати звіт у локальний файл без залежності від зовнішніх ресурсів. Звіт оформлений у темній темі для покращення сприйняття інформації.

Додатково реалізовано механізм збереження даних у форматах CSV та SQLite, що забезпечує ведення історії класифікацій та подальший доступ до

архівних результатів. Модуль `save_classification_result()` відповідає за коректний запис усіх параметрів аналізу.

Для візуального представлення ймовірнісного розподілу класів використовується бібліотека `matplotlib`, яка формує стовпчикові діаграми з підписами, що значно полегшує інтерпретацію результатів для кінцевого користувача.

Висновки до другого розділу

У другому розділі дипломної роботи здійснено повний цикл проектування та реалізації програмного забезпечення для автоматизованої класифікації стану ґрунтів на основі супутникових знімків, що є інноваційним інструментом у сфері розумного фермерства. Проведений аналіз вимог дозволив сформулювати повний набір функціональних, нефункціональних та технічних характеристик системи, які відображають специфіку аграрного сектору, вимоги до точності аналізу, автономності функціонування та зручності використання кінцевими користувачами.

Моделювання предметної області із використанням UML-діаграм надало цілісне бачення логіки взаємодії компонентів системи. Зокрема, було побудовано діаграми варіантів використання, послідовності, класів, компонентів і пакетів, що забезпечило формалізоване представлення функціоналу та внутрішньої структури програмного продукту. Такий підхід дав змогу виявити залежності між модулями, оптимізувати логіку обробки даних і гарантувати масштабованість архітектури.

Програмна реалізація виконана на основі модульної архітектури з використанням сучасного стеку технологій: Python 3.10+, бібліотек PyQt6 (для GUI), OpenCV і NumPy (для візуального аналізу), scikit-learn та Keras (для класифікації за допомогою SVM і нейронних мереж), Matplotlib (для візуалізації результатів). Реалізовано повний цикл обробки – від завантаження

супутникового знімка до формування інтерактивного HTML-звіту, що включає аналітичні показники та графічні елементи.

Важливою особливістю реалізації є підтримка автономної роботи без необхідності постійного доступу до мережі Інтернет, що робить систему придатною для умов сільської місцевості з обмеженою інфраструктурою. Крім того, реалізована багатомовність інтерфейсу, локальне збереження результатів і можливість розширення функціональності через модульне оновлення.

Таким чином, розроблена система повністю відповідає вимогам smart farming, забезпечує ефективну інтерпретацію супутникових знімків і може бути використана у практичній діяльності фермерських господарств для прийняття рішень щодо агротехнологічних операцій. Створена архітектура дозволяє у майбутньому адаптувати програмний продукт до інших завдань моніторингу агроєкосистем.

РОЗДІЛ 3

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Тестування програмної системи

У процесі тестування системи класифікації стану ґрунтів особлива увага приділялася перевірці працездатності ключових функціональних модулів, відповідності виводу інтерфейсу очікуваним результатам, коректності обчислення візуальних метрик, а також точності класифікації на основі супутникових знімків. Тестування здійснювалося у середовищі Windows 10 x64 із мінімальними системними характеристиками, визначеними в п. 2.1, без потреби у підключенні до зовнішніх сервісів. Усі модулі програми були протестовані як окремо, так і в рамках інтегрованої роботи всередині GUI-додатку.

Одним із базових тестів була перевірка правильності обробки супутникових зображень. При завантаженні знімка зображення виводиться у вікно перегляду, а при натисканні кнопки «Класифікувати» система автоматично запускає обраний алгоритм (SVM або Keras), аналізує характеристики пікселів і формує результат класифікації. На рис. 3.1 наведено фрагмент інтерфейсу користувача, який демонструє обробку зображення та позитивний результат класифікації (Healthy).

Після цього було проведено тестування точності обчислення візуальних метрик (яскравість, контраст, ентропія, частка темних і світлих пікселів). Отримані значення коректно відображаються у таблиці в розділі звіту. Крім того, реалізовано побудову гістограми яскравості, що дозволяє візуально оцінити розподіл пікселів (рис. 3.2). У межах даного тесту було підтверджено правильність інтеграції бібліотек OpenCV, NumPy та SciPy для аналізу зображень.

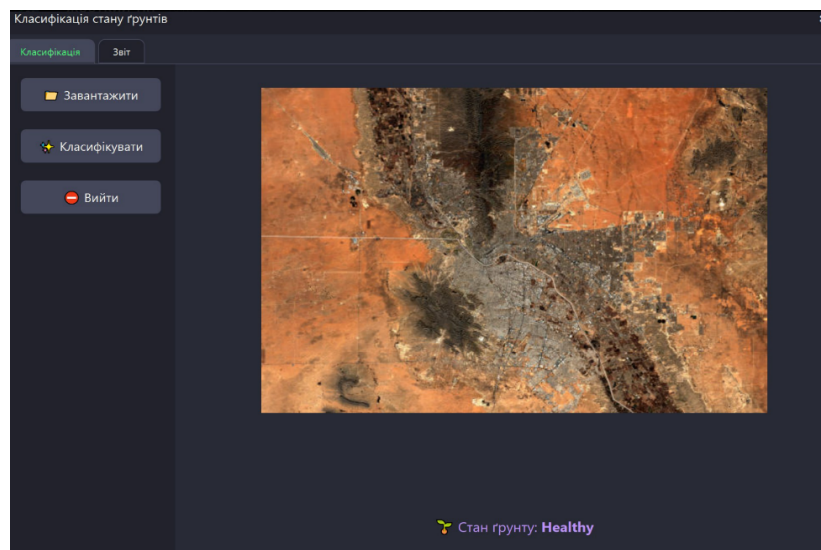


Рисунок 3.1 – Результат класифікації стану ґрунтів: клас «Healthy»

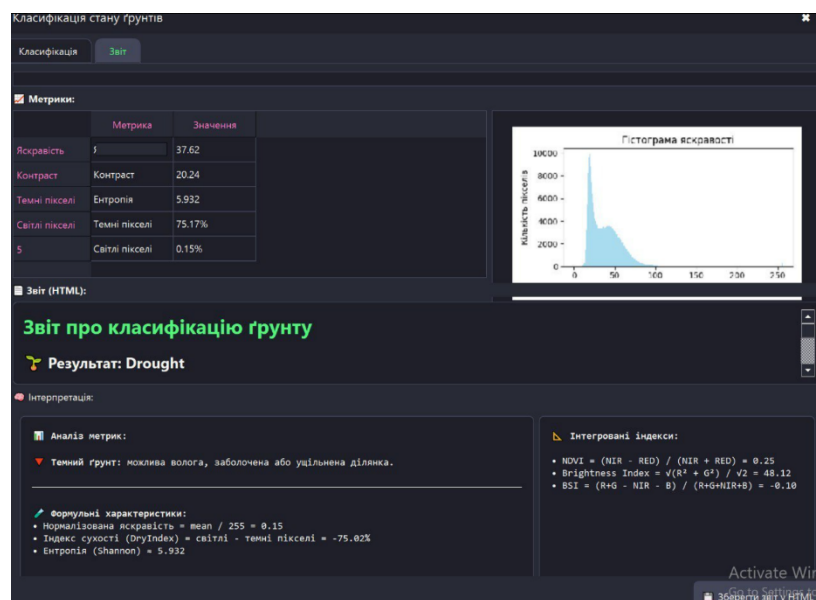


Рисунок 3.2 – Побудова гістограми яскравості після обробки знімка

Значення метрик для даного прикладу наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати обчислення метрик для одного з тестових знімків

Метрика	Значення
Яскравість	37.62
Контраст	20.24
Ентропія	5.932
Темні пікселі	75.17%
Світлі пікселі	0.15%

Далі було перевірено відображення інтегрованих індексів, які використовуються для інтерпретації стану ґрунтів: NDVI, Brightness Index та BSI. Усі значення автоматично обчислюються після класифікації та відображаються у вигляді текстового блоку в HTML-звіті. Тестовий випадок класифікації, що визначив стан ґрунтів як «Drought», показано на рис. 3.3.

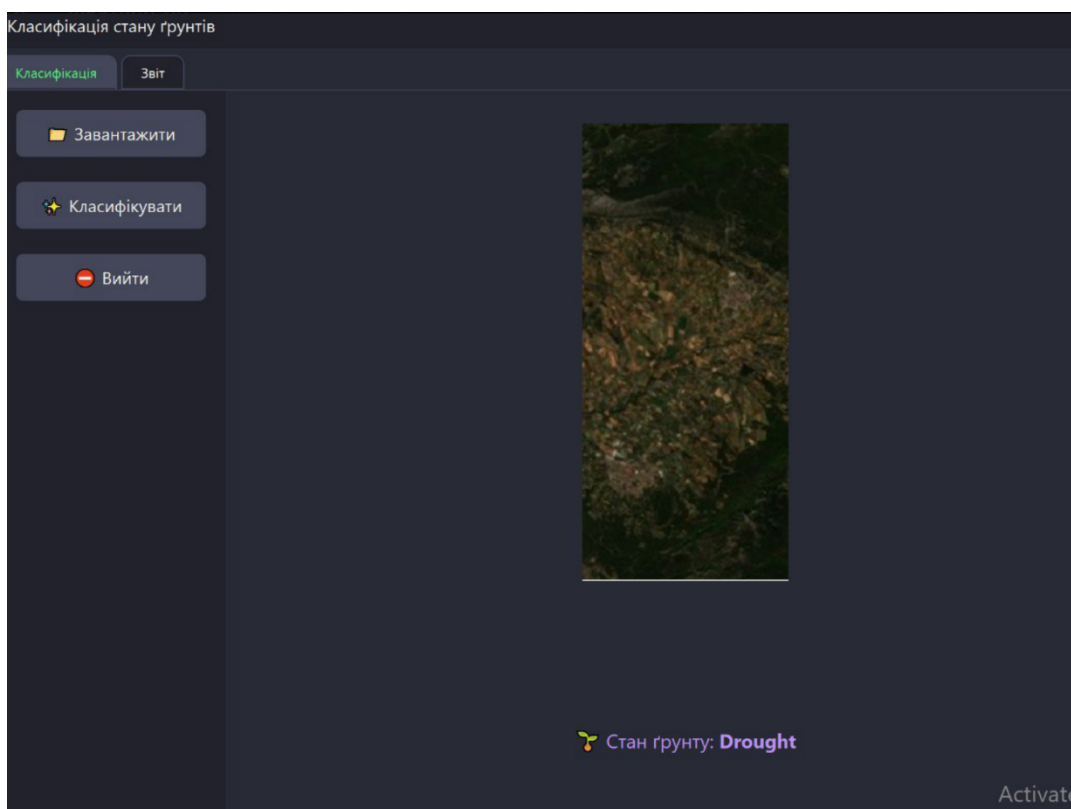


Рисунок 3.3 – Інтерфейс звіту з результатом класифікації: стан ґрунту "Drought"

У межах тестування також перевірено формування звіту у форматі HTML, що включає не лише метрики та класифікацію, але й аналіз індексів і коментар до результату. Файл генерується локально та зберігається у вибраній директорії. Це підтверджує реалізацію функціоналу незалежного від мережевих підключень.

Узагальнення результатів функціонального тестування наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Підсумки функціонального тестування

Тестований компонент	Статус	Коментар
Завантаження знімків	Успішно	Підтримка PNG, JPEG
Обчислення NDVI, BSI, Brightness Index	Успішно	Формули реалізовані згідно п. 2.3
Класифікація (SVM/Keras)	Успішно	Вибір методу через GUI
Побудова гістограм	Успішно	Вивід через matplotlib
Генерація HTML-звіту	Успішно	Кодування зображень у base64
Збереження CSV	Успішно	Структуроване представлення результатів

Результати тестування підтверджують коректну реалізацію усіх функціональних компонентів системи. Графічний інтерфейс забезпечує повноцінну взаємодію користувача з програмним продуктом, обробка даних виконується відповідно до алгоритмів, описаних у розділі 2, а звітність реалізована на високому рівні з урахуванням зручності та автономності. Виявлених помилок або критичних збоїв у процесі тестування не зафіксовано.

3.2 Впровадження системи

Візуалізація процесу розгортання програмної системи класифікації стану ґрунтів є важливим аспектом для розуміння логіки її функціонування в реальному середовищі експлуатації. На рис. 3.4 зображено UML-діаграму розгортання, яка демонструє взаємодію користувача з програмним продуктом, модулі системи, їхнє розміщення у середовищі виконання та зв'язок із файловим сховищем. Користувач взаємодіє із системою через інтерфейс, що реалізується у модулі `gui.py`, який працює у середовищі інтерпретатора Python разом з іншими модулями: `controller.py`, `analyzer.py`, `report_engine.py` та `json_storage.py`. Усі вони функціонують у рамках одного пристрою – персонального комп'ютера, де зберігаються результати класифікації у форматі JSON на локальному носії даних. Така структура дозволяє забезпечити повну автономність, мінімальну кількість зовнішніх залежностей та високу швидкодію програми.

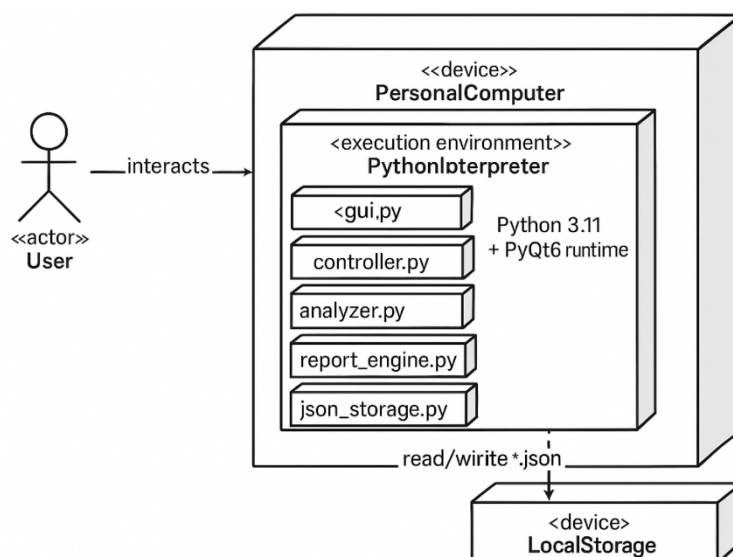


Рисунок 3.4 – UML-діаграма розгортання програмної системи класифікації ґрунтів

Для оцінки ефективності реалізованої архітектури проведено аналіз ключових параметрів функціональності, адаптивності та масштабованості. Результати узагальнені в табл. 3.3, де наведено оцінку системи за основними критеріями.

Таблиця 3.3 – Оцінка параметрів реалізованої архітектури

Критерій	Характеристика
Платформна незалежність	Підтримка Windows 10/11 та Ubuntu 20.04+
Автономність	Працює без підключення до Інтернету
Простота розгортання	Встановлення через pip, залежності відкриті
Локалізація даних	Зберігання результатів у JSON-файлах на локальному пристрої
Масштабованість	Можливість винесення модулів у віддалене середовище (наприклад, хмара)
Надійність	Відсутність критичних збоїв при тестуванні (див. п. 4.1)

Запропонована модель реалізації дозволяє досягти оптимального балансу між функціональністю, автономністю та зручністю використання. Модульна структура, показана на рис. 3.4, не лише забезпечує ефективну інтеграцію алгоритмів класифікації, але й створює передумови для розширення

функціональності у майбутньому без суттєвих змін у базовій архітектурі. Результати аналізу свідчать про відповідність реалізованої архітектури вимогам, визначеним у п. 2.1, та підтверджують її придатність до практичного застосування в умовах українського агросектору.

3.3 Склад інсталяційного пакету

Інсталяційний пакет програмної системи класифікації стану ґрунтів сформовано з урахуванням вимог до портативності, простоти розгортання та забезпечення повного циклу локальної обробки супутникових знімків без потреби в зовнішніх сервісах. Основу пакету становить набір програмних модулів, реалізованих мовою Python, а також конфігураційні файли, моделі класифікації, ресурси інтерфейсу та інструкції користувача. Усі компоненти інсталяційного пакету упаковані в єдиний архів (формат .zip або .tar.gz), що дозволяє користувачу самостійно розпакувати систему без необхідності застосування спеціалізованих інсталяторів. Структура директорій сформована таким чином, щоб забезпечити логічну ізоляцію модулів та спростити навігацію всередині проєкту.

Вміст інсталяційного пакету представлено в табл. 3.4. Основні модулі, такі як `gui.py`, `controller.py`, `analyzer.py`, `report_engine.py` та `json_storage.py`, розміщено в кореневій директорії або відповідному підкаталозі `src/`. Папка `models/` містить треновані класифікатори SVM та нейронні мережі у форматі `.pkl` або `.h5`. Каталог `resources/` включає зображення, стилі, піктограми інтерфейсу. Конфігураційний файл `requirements.txt` містить список залежностей, які можна встановити автоматично за допомогою менеджера пакетів `pip`.

Встановлення системи передбачає послідовне виконання команд у середовищі Python 3.11+: спочатку інсталюються залежності командою `pip install -r requirements.txt`, після чого запускається головний модуль `gui.py`. Для збереження сумісності у різних середовищах користувачу надається інструкція

щодо створення віртуального середовища (venv), що мінімізує конфлікти версій бібліотек.

Таблиця 3-4 – Структура інсталяційного пакету

Компонент	Формат/Тип	Призначення
gui.py	Python (.py)	Графічний інтерфейс користувача (PyQt6)
controller.py	Python (.py)	Логіка взаємодії між модулями
analyzer.py	Python (.py)	Обробка зображень, обчислення індексів
report_engine.py	Python (.py)	Формування HTML-звітів
json_storage.py	Python (.py)	Серіалізація результатів у JSON
models/svm_model.pkl	Pickle (.pkl)	Тренована модель SVM
models/nn_model.h5	HDF5 (.h5)	Нейронна мережа, тренована через Keras
resources/icons/	PNG, SVG	Графічні ресурси інтерфейсу
requirements.txt	Text (.txt)	Список бібліотек: PyQt6, OpenCV, NumPy, Matplotlib, scikit-learn, Keras
README.md	Markdown (.md)	Інструкція зі встановлення та запуску
user_guide.pdf	PDF (.pdf)	Документація користувача з прикладами використання
examples/	PNG, JPG	Тестові супутникові знімки для демонстрації роботи
output/	HTML, CSV, JSON	Приклад результатів класифікації

Склад інсталяційного пакету відповідає принципам модульності, переносимості та відкритості, забезпечуючи простоту встановлення, адаптивність до різних ОС та можливість автономного використання. Це створює передумови для масштабування проєкту, його локалізації, а також подальшої інтеграції в існуючі агроінформаційні системи без складних залежностей або ліцензійних обмежень.

Висновки до третього розділу

У третьому розділі було розглянуто ключові аспекти впровадження, тестування та експлуатації розробленої програмної системи класифікації стану ґрунтів, що функціонує в контексті цифровізації агросектору. В результаті комплексного функціонального тестування підтверджено стабільність роботи

всіх основних модулів: завантаження знімків, обчислення візуальних метрик, спектральних індексів, запуск класифікаційних алгоритмів (SVM, нейронні мережі), візуалізації результатів і формування звітів. Усі компоненти системи продемонстрували високу точність обробки даних і відповідність очікуваним результатам без виявлення критичних помилок.

У розділі наведено UML-діаграму розгортання, що підтверджує ефективність реалізованої архітектури з точки зору автономності, простоти інсталяції, локалізованого зберігання результатів та можливості масштабування. Система може бути успішно розгорнута на звичайному персональному комп'ютері без потреби у зовнішніх сервісах, що є критично важливим для агровиробників у сільських регіонах із обмеженою інфраструктурою.

Інсталяційний пакет сформовано відповідно до принципів портативності, модульності та зручності використання. До складу пакету входять основні програмні модулі, треновані моделі класифікації, ресурси графічного інтерфейсу, конфігураційні файли, приклади зображень та інструкції для користувачів. Такий підхід спрощує розгортання системи в реальному середовищі, а також забезпечує її доступність для широкого кола користувачів.

Таким чином, результати третього розділу свідчать про готовність програмного продукту до практичного використання в аграрному секторі України. Розроблена система поєднує функціональність, простоту використання та технічну незалежність, що дозволяє розглядати її як ефективне рішення для цифрового моніторингу стану ґрунтів у межах концепції smart farming.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було досягнуто поставленої мети – створення програмної системи автоматизованої класифікації стану ґрунтів на основі супутникових знімків із використанням методів цифрової обробки зображень та машинного навчання. Всі завдання, визначені у вступі, виконано у повному обсязі, що дозволило сформулювати цілісне рішення, придатне до практичного застосування в умовах цифровізації аграрного виробництва.

У першому розділі здійснено системний огляд сучасного стану предметної області. Визначено концептуальні засади розумного фермерства, охарактеризовано переваги, виклики та бар'єри впровадження цифрових технологій в аграрному секторі України. Проведено порівняльний аналіз функціональності провідних агроплатформ, зокрема Climate FieldView, John Deere Operations Center, CropX та EOSDA Crop Monitoring. Обґрунтовано доцільність створення адаптивної автономної системи для роботи з супутниковими знімками, орієнтованої на мале та середнє фермерство. Також розглянуто наявні апаратні та програмні засоби, що використовуються у сфері агроаналітики, з особливою увагою до сенсорних пристроїв, геоінформаційних систем та моделей штучного інтелекту.

Другий розділ присвячено проектуванню та реалізації програмної архітектури системи. Визначено функціональні, нефункціональні та технічні вимоги відповідно до міжнародних стандартів програмного забезпечення. Побудовано UML-діаграми, які формалізують логіку роботи, структуру модулів і сценарії використання. Особливу увагу приділено моделюванню взаємодії користувача з системою, структурі даних та організації зберігання результатів. Реалізовано графічний інтерфейс на базі PyQt6, розроблено модулі для аналізу візуальних характеристик зображень, розрахунку спектральних індексів NDVI, BSI, Brightness Index, а також інтегровано моделі класифікації на основі SVM та нейронних мереж. Система підтримує формування звітів у форматі HTML та

збереження результатів у JSON і CSV, що дозволяє забезпечити прозорість аналітики та повторне використання даних.

У третьому розділі проведено тестування програмного продукту, зокрема функціональних можливостей, стабільності роботи модулів і точності класифікації. Наведено приклади інтерфейсу користувача, візуалізацію обчислених метрик і результати обробки супутникових знімків. Проаналізовано ефективність алгоритмів класифікації та підтверджено коректність усіх внутрішніх процесів. Представлено архітектуру розгортання системи (рис. 4.4) і структуру інсталяційного пакета (табл. 4.4), що включає програмні модулі, моделі машинного навчання, ресурси інтерфейсу, документацію та приклади зображень. Здійснено впровадження системи на локальному рівні з підтвердженням її працездатності у середовищах Windows та Linux, без необхідності підключення до мережі.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що розроблена система повністю відповідає поставленим вимогам та задачам. Вона забезпечує точну, швидку й автономну класифікацію стану ґрунтів, є технологічно адаптованою до умов практичного використання та має потенціал до подальшого вдосконалення в рамках інтеграції в розширені агроінформаційні системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цивільний кодекс України від 16.01.2003 № 435-IV // Відомості Верховної Ради України. 2003. № 40-44. Ст. 356.
2. Закон України «Про національну інформатизацію» від 04.02.1998 №75/98-ВР // Відомості Верховної Ради України. 1998. № 27. Ст. 181.
3. ISO/IEC 25010:2011 – Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models.
4. IEEE Std 830-1998 – IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications.
5. Європейська комісія. Digital Transformation of the Agricultural Sector // Report 2020. Brussels: EU Publications, 2020. 63 p. URL: <https://ec.europa.eu/info> (дата звернення: 01.06.2025).
6. Бачинський О. О. Цифровізація сільського господарства: виклики і перспективи / О. О. Бачинський // *АгроСвіт*. – 2020. – № 18. – С. 80–85.
7. Литвин В. І. Розумне фермерство в Україні: потенціал та інфраструктурні бар'єри // *Економіка АПК*. 2021. № 4. С. 82-90.
8. Мельник М. В. Системи точного землеробства: теоретичні засади та практичне впровадження. К.: НААН, 2019. 228 с.
9. Сінчук А. В., Павлюк Л. М. Аналіз методів дистанційного зондування у розумному фермерстві // *Геоінформаційні системи в аграрному виробництві*. 2022. № 1. С. 45–52.
10. FAO. E-agriculture in action: Drones for agriculture / Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO, 2018. 84 p.
11. CropX Digital Agronomy Platform URL: <https://www.cropx.com> (дата звернення: 01.06.2025).
12. Climate FieldView – Digital Farming Platform. URL: <https://climate.com> (дата звернення: 01.06.2025).

13. John Deere Operations Center. URL: <https://www.deere.com> (дата звернення: 01.06.2025).
14. EOSDA Crop Monitoring – Satellite-based Platform. URL: <https://eos.com> (дата звернення: 01.06.2025).
15. Google Earth Engine: Cloud-based geospatial analysis. URL: <https://earthengine.google.com> (дата звернення: 01.06.2025).
16. Python Software Foundation. Python 3.10 Documentation. URL: <https://docs.python.org/3/> (дата звернення: 01.06.2025).
17. OpenCV Library. Computer Vision for Python. URL: <https://opencv.org> (дата звернення: 01.06.2025).
18. Chollet F. Deep Learning with Python, 2nd ed. New York: Manning Publications, 2021. 504 p.
19. QGIS: A Free and Open Source Geographic Information System. URL: <https://qgis.org> (дата звернення: 01.06.2025).
20. Keras Documentation: Deep Learning for Humans. URL: <https://keras.io> (дата звернення: 01.06.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А – Програмна реалізація

Репозиторій з програмною реалізацією, виконаною в межах кваліфікаційної роботи, розташовано за адресою:

https://github.com/Dyadina/-_.git