

МОБІЛЬНІ ЗАСОБИ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ХВОРОБ РОСЛИН НА ОСНОВІ ЗОБРАЖЕНЬ

Лиса Н.К.

д.т.н., доцент, кафедра автоматизовані системи управління, Національний
університет «Львівська політехніка»

Шамановський Б.В.

аспірант, кафедра прикладної математики, Національний університет
«Львівська політехніка»

Щербина А.Е.

студент, кафедра автоматизовані системи управління, Національний
університет «Львівська політехніка»

***Анотація.** Робота присвячена розробці мобільних засобів розпізнавання хвороб рослин на основі зображень. Запропоноване рішення дозволяє своєчасно та точно ідентифікувати захворювання рослин за допомогою камер смартфона. Система призначена для фермерів, дослідників і широкої громадськості. Розглянуто особливості його проектування та реалізації. Мобільний додаток є зручним і доступним інструментом для мінімізації втрат врожаю та підтримки зусиль у сфері продовольчої безпеки.*

***Ключові слова:** РОЗПІЗНАВАННЯ ХВОРОБ РОСЛИН, ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК, ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗА ФОТО, МАШИННЕ НАВЧАННЯ.*

Вступ

Сучасне сільське та лісове господарство часто стикається з масштабними проблемами, пов'язаними із вірусними захворюваннями рослин, які призводять до значних економічних втрат та загострюють питання глобальної продовольчої безпеки. З огляду на активне впровадження біотехнологій, біологічна безпека дедалі більше набуває ваги як складова національної безпеки. Проте, на сьогоднішній день проблема поширення нових штамів та стійких форм фітовірусів, особливо в агросекторі України, залишається недостатньо вивченою [1].

Забезпечення ефективного захисту рослин від вірусних інфекцій неможливе без своєчасної діагностики, проведення комплексу профілактичних заходів, що включають виявлення переносників фітовірусів, ідентифікацію рослин-резерваторів, вирощування стійких сортів, а також використання оздоровленого насіннєвого та садивного матеріалу.

У роботі [2] у контексті сучасної фітопатології важливу роль відіграє дослідження молекулярних основ взаємодії вірусу з організмом рослини-господаря. Знання таких механізмів не лише сприяє кращому розумінню патогенезу, а й слугує основою для створення новітніх методів профілактики та терапії вірусних хвороб.

Вивчення генетичної варіабельності вірусів та аналіз тенденцій їх розповсюдження дає змогу формувати прогностичні моделі, що враховують зміни у вірулентності, визначають еволюційні зв'язки між різними штамми, оцінюють ризики появи нових агресивних форм та моделюють потенційні шляхи поширення. Особливу увагу варто звертати на природні резервуари збудників, які можуть зберігатися у воді, ґрунті або на поверхні рослин, створюючи сприятливі умови для подальшого інфікування культурних видів.

Мета та задачі дослідження

Метою представленої роботи є створення мобільного інструменту для розпізнавання захворювань рослин за допомогою зображень, що дозволить оперативно виявляти симптоми хвороб та рекомендувати дії для їх контролю. Основними завданнями такого рішення є:

- зменшення втрат урожаю завдяки точній та швидкій діагностиці хвороб;
- сприяння покращенню продовольчої безпеки шляхом стримування поширення захворювань;
- забезпечення широкого доступу до технології через мобільні пристрої.
- проведення системного моніторингу рівня вразливості різних видів культурних рослин до патогенів, що дозволяє оцінити ризики ураження на етапі планування агротехнічних заходів;
- вивчення та оцінювання технічних засобів і цифрових технологій, які використовуються для запобігання економічним втратам, що виникають внаслідок розповсюдження захворювань серед сільськогосподарських рослин;
- аналіз аспектів економічної безпеки агропідприємств через призму впливу фітопатогенів, які, маючи високу руйнівну здатність, можуть спричинити суттєве зниження врожайності та фінансову нестабільність господарств, впливаючи при цьому і на продовольчу безпеку країни;
- розробка та впровадження програмно-алгоритмічних рішень, здатних автоматизовано виявляти ознаки хвороб на ранніх стадіях розвитку, що значно підвищує шанси на успішне лікування або ізоляцію уражених рослин;
- критичний аналіз наявних мобільних застосунків і програмного забезпечення, орієнтованого на ідентифікацію захворювань рослин за зображенням, із метою виявлення їх ефективності, точності та доцільності використання у практиці фермерських господарств.

Основна частина

Наукова новизна запропонована у роботі [3] модель і мобільні засоби для розпізнавання хвороб рослин на основі обробки зображень становлять собою інноваційний підхід до підвищення ефективності управління фітосанітарним станом агроєкосистем. Результати дослідження мають як теоретичну, так і прикладну цінність, а новизна полягає у таких положеннях:

– розроблено прототип мобільного застосунку, що дозволяє здійснювати оперативне визначення ознак хвороб рослин у польових умовах без необхідності залучення лабораторного обладнання або спеціалізованої підготовки користувача. Це відкриває широкі можливості для інтеграції технології у практику фермерських господарств та приватного землекористування;

– реалізовано підхід до раннього виявлення захворювань, який базується на аналізі візуальних ознак, зафіксованих у зображеннях. Своєчасна діагностика патологій рослин на початкових стадіях дозволяє запобігати поширенню хвороб, зменшити втрати врожаю та мінімізувати витрати на захисні заходи;

– запропонована модель сприяє оптимізації аграрних процесів, забезпечуючи точну і локалізовану діагностику. Такий підхід дозволяє знизити обсяги застосування пестицидів, тим самим зменшуючи негативний вплив на довкілля та покращуючи екологічну безпеку виробництва;

– модель та інструментарій спрямовані на підтримку продовольчої безпеки, оскільки зниження втрат урожаю внаслідок фітопатогенних уражень напрямку пов'язане з ефективністю технологій моніторингу та своєчасного реагування на фітосанітарні загрози.

Серед сучасних виробників сільськогосподарської продукції зростає зацікавленість у впровадженні автоматизованих рішень для управління агровиробництвом. Одним із ключових напрямів є автоматизоване візуальне розпізнавання стану сільськогосподарських культур, яке дозволяє підвищити точність оцінки фітосанітарного стану рослин та суттєво скоротити витрати, пов'язані з ручною працею. Особливо актуальною ця проблема є у сфері виявлення хвороб зернових культур на ранніх етапах розвитку. Візуальний огляд значної кількості рослин вручну потребує великих людських ресурсів, що в умовах польових робіт є малоефективним та економічно невиправданим [4].

Для невеликих аграрних господарств критичною є потреба у доступних і зрозумілих методичних матеріалах щодо впровадження, експлуатації та адаптації сучасних технологій комп'ютерного зору до потреб сільського господарства. Однак, через складність деяких проявів хвороб, не завжди вдається точно виявити патологічні зміни візуально, що створює передумови для створення автоматизованих інформаційних систем, здатних аналізувати зображення та визначати наявність уражень у режимі реального часу.

З огляду на ці виклики, доцільним є впровадження програмно-апаратних рішень, які здатні на основі змін кольору листя і структури рослин ідентифікувати ознаки захворювання ще до появи явних симптомів. Такі системи можуть відігравати важливу роль у запобіганні втратам врожаю, забезпечуючи аграріям своєчасну інформацію для прийняття управлінських рішень, а також сприяти підвищенню економічної безпеки фермерських господарств.

Зважаючи на те, що хвороби рослин – явище неминуче, ключовим фактором є своєчасне їх виявлення. Застосування сучасних інформаційних технологій, зокрема веб-застосунків або мобільних додатків, дозволяє зменшити ризики, виявляючи ознаки ураження на ранніх стадіях [5].

Наприклад, зображення ураженого листя (рис. 1) може бути завантажене в мобільний застосунок, який ідентифікує хворобу – наприклад, буру плямистість (кладоспоріоз) томатів, що часто поширюється за умов підвищеної вологості та тепла.



Рисунок 1 – Листок томата з ознаками бурої плямистості

Розвиток бурої плямистості томатів (*Cladosporium fulvum*) значною мірою залежить від сприятливих кліматичних умов, зокрема підвищеної температури повітря та високої відносної вологості. Збудник захворювання уражає листковий апарат, поширюючись з нижніх ярусів рослини догори, що в підсумку може призвести до повної втрати фотосинтезуючої поверхні. У зв'язку з цим особливої важливості набуває своєчасне виявлення патології на початковій стадії її розвитку [6].

Для обмеження поширення кладоспоріозу доцільно застосовувати комплекс агротехнічних заходів, таких як контроль мікрокліматичних параметрів у теплицях (регулювання вологості та температури), оптимізація вентиляційного режиму, своєчасне видалення та утилізація уражених частин рослин. Додатково до профілактичних заходів рекомендовано проводити фунгіцидну обробку культур із метою запобігання подальшій ескалації інфекції.

У межах розробленої мобільної системи розпізнавання хвороб, після збереження зображення рослини у відповідний каталог, користувач переходить до розділу аналізу збережених екземплярів. На цьому етапі здійснюється автоматичне виявлення візуальних ознак ураження на основі специфічних параметрів: зміни кольорової гами листя, морфологічних особливостей структури листової пластинки тощо. Результати ідентифікації зберігаються у відповідному розділі «Історія» (рис. 2), що забезпечує можливість відстеження динаміки захворювання та формування історії спостережень для кожної окремої рослини.

Алгоритм функціонування мобільного комплексу діагностики фітопатологій.

Розроблений мобільний діагностичний комплекс базується на поєднанні технічних засобів виявлення візуальних ознак захворювань рослин з алгоритмами обробки зображень у реальному часі. Алгоритм його функціонування передбачає такі основні етапи.

1. Навігація пересувної платформи, яка, отримуючи сигнал від вбудованого мікроконтролера або управляючого модуля, виконує переміщення за заздалегідь визначеним маршрутом, що забезпечує систематичне охоплення ділянки агровиробництва.

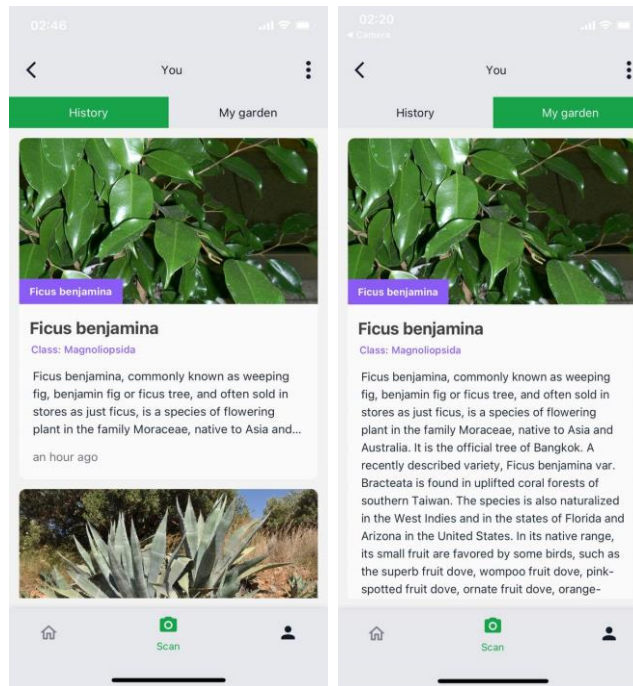


Рисунок 2 – Сторінка “Історія”, сторінка Мій сад”

2. Формування відеопотоку за допомогою камери високої роздільної здатності, встановленої на платформі. Отримані зображення у режимі реального часу надходять до обчислювального модуля для подальшої аналітичної обробки.

3. Ідентифікація симптомів фітозахворювань здійснюється шляхом застосування алгоритмів машинного навчання, що дозволяє з високою точністю виявляти ознаки ураження листя, зокрема зміни кольору, структури поверхні, появу плям чи некрозу.

4. Оцінка ступеня ураження реалізується за допомогою визначення кількісних характеристик (площа ураження, кількість пошкоджених елементів), що дозволяє провести диференційовану класифікацію рослин за рівнем пошкодження.

5. Виведення діагностичних результатів у вигляді автоматизованих висновків щодо стану культур. Результати можуть інтегруватися у систему історичного моніторингу та подальшого прогнозування розвитку ситуації [7].

Ключовою перевагою цього підходу є можливість візуального контролю стану посівів без участі людини, що суттєво знижує витрати часу і ресурсів, а також забезпечує екологічну безпеку завдяки зменшенню потреби у масовому використанні пестицидів.

Особливої актуальності розробка набуває для великих агропідприємств, де традиційне спостереження за кожною окремою рослиною є економічно недоцільним і технічно складним. Автоматизована система дозволяє здійснювати оперативне виявлення патогенних процесів, реагувати на загрози ще до появи видимих наслідків, зберігаючи при цьому рентабельність виробництва та біорізноманіття сільськогосподарських угідь.

Математичні моделі та методи

У межах системи автоматизованого розпізнавання стану рослин важливим аспектом є ефективне застосування математичних моделей і методів машинного зору для класифікації рослин за зображеннями квітів і листя. Розглянемо ключові етапи такого аналізу.

1. Попередня обробка зображень.

Цей етап забезпечує покращення якості вхідних даних для подальшого аналізу. До основних методів належать:

- фільтрація зображень, зокрема використання гауссівських і медіанних фільтрів для зменшення шумів;
- сегментація, що передбачає виділення об'єктів інтересу (наприклад, листя або квітів) із фону. Застосовуються методи порогової обробки, алгоритми кластеризації (наприклад, метод k-середніх), а також методи на основі регіонів;
- нормалізація, яка спрямована на уніфікацію яскравості та контрасту зображень з метою досягнення однорідності серед зразків.

2. Вилучення ознак.

На цьому етапі зображення перетворюється у набір числових характеристик для подальшої класифікації:

- кольорові ознаки: гістограми кольору, середні значення каналів, статистичні моменти розподілу кольору;
- текстурні ознаки: матриці співвідношень сірого рівня (GLCM), локальні бінарні шаблони (LBP), вейвлет-перетворення;
- геометричні ознаки: контури об'єктів, моменти Ху, фрактальна розмірність;
- ознаки, отримані за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN), які автоматично формуються в процесі навчання, наприклад, з використанням моделей ResNet, VGG та інших.

3. Методи класифікації.

Для класифікації зображень застосовуються алгоритми машинного навчання:

- метод опорних векторів (SVM) – ефективний для високовимірних даних;
- дерева рішень та випадкові ліси (Random Forest) – характеризуються високою стійкістю до шуму та перенавчання [8];
- метод k-найближчих сусідів (k-NN) – простий та ефективний для невеликих вибірок;
- глибокі згорткові нейронні мережі (CNN) – дозволяють досягти високої точності класифікації завдяки багаторівневому вилученню ознак.

4. Оцінювання ефективності моделей.

Для перевірки якості роботи алгоритмів застосовуються такі метрики:

- точність (accuracy), повнота (recall), F1-міра;
- матриця невідповідностей (confusion matrix) для аналізу помилок класифікації;
- крос-валідація, яка дозволяє оцінити узагальнювальну здатність моделей на різних підмножинах даних;

– візуалізація результатів класифікації, що допомагає ідентифікувати проблемні класи або невизначеність між категоріями.

5. Математичні засади методів.

У процесі реалізації описаних етапів задіяні такі математичні дисципліни:

– лінійна алгебра – для представлення зображень у вигляді матриць та трансформацій ознак;

– теорія ймовірностей і математична статистика – для аналізу розподілів ознак і статистичної оцінки ефективності;

– математичний аналіз – для реалізації вейвлет-перетворень та обробки сигналів;

– методи машинного та глибокого навчання – як основа для побудови та оптимізації моделей класифікації.

Використання лінійної алгебри та методів комп'ютерного зору в задачах розпізнавання рослин.

У роботі [9] описано, що сучасні системи автоматичного розпізнавання стану рослин активно використовують математичні методи, зокрема – лінійну алгебру та комп'ютерне бачення. Такі підходи дозволяють вирішувати важливі завдання в аграрній сфері, зокрема: розпізнавання хвороб рослин за зображеннями листя, класифікація видів рослин за зображеннями квітів і листя, моніторинг росту та розвитку культур, визначення сортності сільськогосподарських культур. Задача розпізнавання рослинних об'єктів є складною, оскільки вимагає точного аналізу візуальних ознак. Для цього використовуються сучасні підходи машинного і глибокого навчання, які дають змогу досягти високих результатів.

1. Зображення як матриця. У цифровому вигляді зображення представляється у формі матриці, де кожен елемент відповідає пікселю з певним кольоровим значенням. Наприклад, у зображеннях у форматі RGB кожен піксель має три значення: інтенсивність червоного, зеленого та синього кольору. Такий формат дозволяє застосовувати до зображень різноманітні операції лінійної алгебри.

2. Основні математичні операції. Під час обробки зображень активно використовуються такі операції: додавання, віднімання матриць – застосовуються для регулювання яскравості та контрастності; матричне множення – використовується під час згортки з фільтрами, яка дозволяє виявити контури, текстуру або інші важливі ознаки. Транспонування матриць – використовується, зокрема, для зміни орієнтації зображення. Сингулярне розкладання (SVD) – допомагає зменшити розмірність даних та виокремити ключові компоненти. Власні значення та власні вектори – застосовуються для аналізу структурних характеристик зображення [10].

3. Згортка та нейронні мережі. Операція згортки – це одна з найважливіших у системах комп'ютерного зору, особливо в згорткових нейронних мережах (CNN). Під час згортки спеціальний фільтр «проходить» по зображенню та дозволяє виявити характерні елементи, наприклад краї або плями ураження.

4. Вилучення ознак. Для того щоб система змогла класифікувати рослину чи виявити хворобу, потрібно перетворити зображення на набір числових характеристик – ознак. До таких методів належать:

- перетворення Фур'є – переводить зображення у частотну область, що допомагає виявити текстурні особливості;
- метод головних компонент (РСА) – дозволяє скоротити кількість ознак, зберігаючи найважливішу інформацію.

5. Практичне застосування. Методи, описані вище, використовуються в реальних системах для таких завдань:

- визначення розміру рослини за зображенням;
- виявлення уражених ділянок;
- аналіз візуальних ознак хвороб для їх ідентифікації;
- кількісна оцінка ступеня розвитку ураження.

Такі підходи дозволяють автоматизувати процес моніторингу стану рослин і зменшити вплив людського фактора. Це особливо важливо для великих аграрних підприємств, де ручне спостереження є малоефективним (рис. 3).



Рисунок 3 – Дерево проблем

Напрямок перший – ідентифікація захворювання рослин:

- створення ефективного рішення для швидкого виявлення захворювань рослин;
- забезпечення сумісності з усіма мобільними операційними системами;
- пошук простих та зрозумілих методів для ідентифікації хвороб рослин.

Напрямок другий – архітектура застосунку:

- розробка гнучкої архітектури для серверної частини;
- створення зручної архітектури для клієнтської частини;
- визначення ключових аспектів інформаційної моделі.

Напрямок третій – дослідження та реалізація:

- аналіз програмних аналогів та пошук літератури;
- проведення досліджень у предметній області;
- розробка концептуальної моделі для проєкту;
- тестування функціональності створеного програмного рішення.

Дерево цілей для системи розпізнавання захворювань рослин.

1. Виділення ключових особливостей на зображенні рослини за допомогою фільтрів, які дозволяють помітити важливі деталі.

2. Фіксація розташування знайдених елементів для подальшого аналізу стану рослини.

Це дозволяє побудувати зрозумілу структуру етапів досягнення основної мети. У сучасному сільському господарстві активно використовують різні підходи до розпізнавання хвороб рослин. Кожен метод має свої переваги та особливості. Щоб виявити ознаки захворювання, спочатку обробляють зображення рослини, після чого виділяють важливі властивості кожної точки зображення – так звані дескриптори, які допомагають точно описати стан рослини.

Основною метою є створення вебзастосунку, який розпізнає захворювання рослин за зображенням. Під час тестування було використано фото, на якому відсутні рослини. У такому випадку система відкриває модальне вікно з відповідним повідомленням (рис. 4).

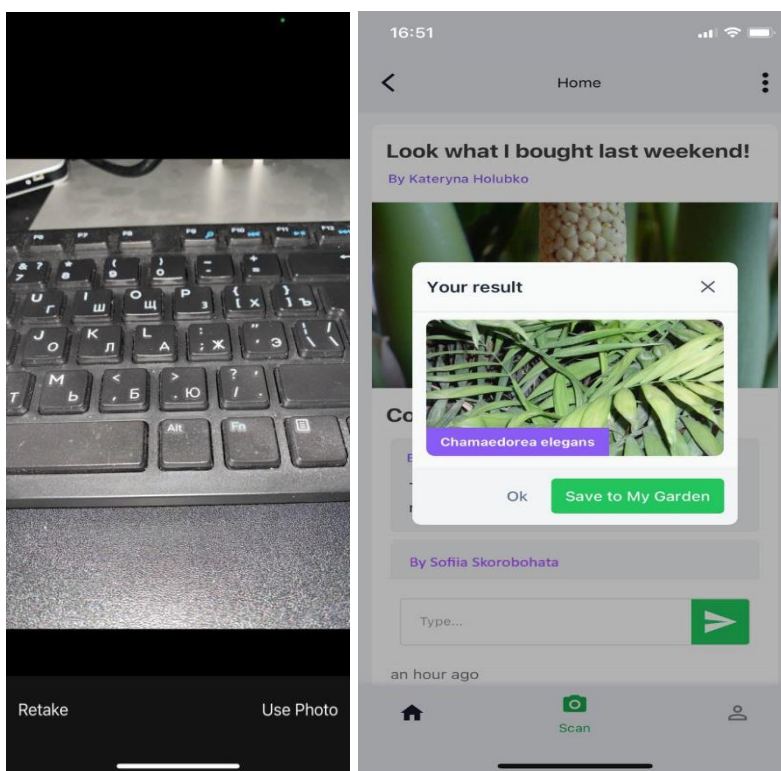


Рисунок 4 – Зображення експерименту з ідентифікації (не рослини)

На рис. 4 показано повідомлення “Not a plant” (не рослина), яке з’явилося у модальному вікні після спроби розпізнавання клавіатури на фото. Це свідчить про правильну реакцію системи на невідповідне зображення. Додатково було проведено серію тестів з неякісними фото (рис. 5). Однією з основних проблем у розпізнаванні кольорових ознак хвороб є шуми, що виникають через спалах або нестабільне освітлення. Для покращення результатів підбираються відповідні фільтри, враховуючи тип рослини та умови зйомки. Продemonстровано повідомлення “Not a plant” (не рослина), яке з’явилося у модальному вікні після спроби обробки зображення клавіатури. Це свідчить про коректну роботу системи в умовах невідповідного вхідного зображення.

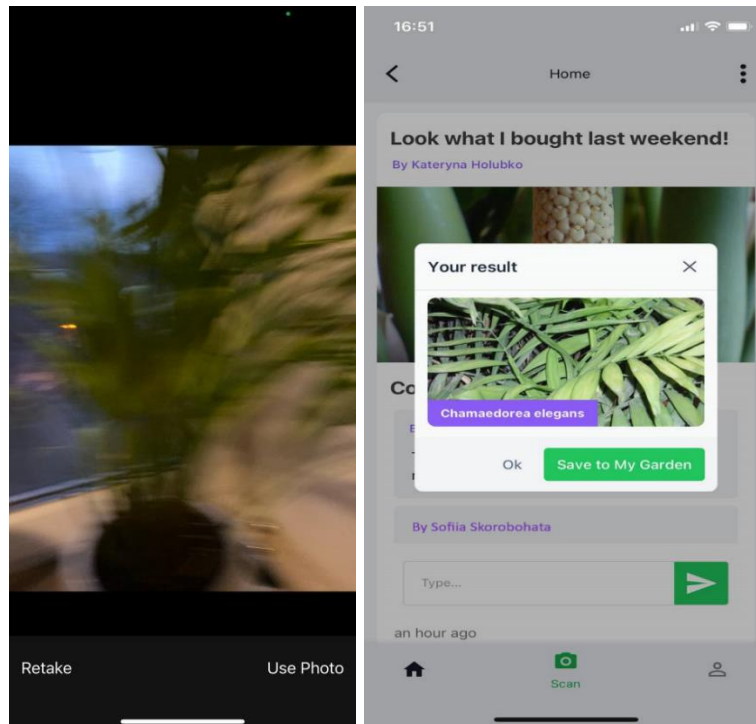


Рисунок 5 – Аналіз результатів ідентифікації хвороби рослин за зображенням з низькою якістю

Крім того, проведено тести з фото низької якості. Однією з ключових перешкод для точного розпізнавання симптомів хвороб є наявність шумів, спричинених спалахом або зміною освітлення. Для мінімізації таких впливів використовуються відповідні фільтри, які підбираються залежно від виду рослини та умов фотографування.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було розроблено ефективну програмно-апаратну систему для автоматизованого розпізнавання хвороб рослин на основі зображень, що дозволяє здійснювати ранню діагностику фітопатологічних змін у реальних умовах польового господарства. Система демонструє ряд важливих переваг:

- оперативність та зручність використання безпосередньо в умовах відкритого ґрунту або теплиць без потреби у спеціальному лабораторному обладнанні;
- висока точність ідентифікації захворювань, що дозволяє значно зменшити кількість хибнопозитивних або хибнонегативних висновків під час первинного аналізу;
- зменшення потреби в масовому застосуванні хімічних засобів захисту, що сприяє зниженню агрохімічного навантаження на навколишнє середовище та підтриманню екологічного балансу;
- можливість інтеграції у наявні цифрові агроплатформи, що забезпечує послідовність та сталість в агротехнологічних процесах.

Таким чином, запропоноване рішення становить практичну цінність для аграрного сектору, оскільки забезпечує зменшення втрат урожаю, оптимізацію процесів прийняття рішень, підвищення якості сільськогосподарської продукції та покращення економічної стійкості аграрних підприємств. Окрім того, широке впровадження подібних систем може стати важливим кроком у напрямі цифрової трансформації агровиробництва та сталого розвитку сільського господарства. Аналіз методів розпізнавання хвороб рослин у сільському господарстві засвідчив актуальність застосування сучасних технологій. Водночас, наявність помилок під час ідентифікації залишається серйозною проблемою. У межах дослідження було розглянуто приклади виявлення уражених ділянок листя із використанням колірних детекторів, що дало змогу підвищити точність виділення певних зон зображення. Однак, ділянки, що перебувають у тіні, часто залишаються неідентифікованими. Це свідчить про необхідність подальших досліджень і вдосконалення підходів.

Перспектива розвитку роботи полягає у впровадженні елементів гейміфікації – системи досягнень, які користувач може отримати за певні дії у застосунку. Це популярний механізм залучення користувачів, що мотивує їх проводити більше часу в системі. Наприклад, можна передбачити нагороди за запрошення друзів або додавання певної кількості рослин у розділ “Мій сад” – зокрема, досягнення за десяту додану рослину.

Список літератури.

1. Девіс, Р., Терк, М. (2022) Комп'ютерний зір. Передові методи та глибоке навчання. ДМК-Прес.
2. Дудник, А.В. (2011). Сільськогосподарська ентомологія. МДАУ.
3. Barbedo, J.G.A. (2019). Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*.
4. Ferentinos, K.P. (2018). Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. *Computers and Electronics in Agriculture*.
5. Sladojevic, S., Arsenovic, M., Anderla, A., Culibrk, D., & Stefanovic, D. (2016). Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Computational Intelligence and Neuroscience*.
6. Mohanty, S.P., Hughes, D.P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*.
7. Brahimi, M., Arsenovic, M., Laraba, S., Sladojevic, S., Boukhalfa, K., & Moussaoui, A. (2018). Deep learning for plant diseases: Detection and saliency map visualisation. *Human and Machine Learning*.
8. Шпак, З.Я. (2011). Програмування мовою С. Львівська політехніка.
9. Матвієнко, М.П. (2017). Комп'ютерна логіка «Ліра-К».
10. Ланде, Д.В. (2006). Пошук знань в інтернеті. «Вільямс».