

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»**

**на тему: «Система автоматизованого аналізу стану та контролю
росту рослин»**

Виконав (-ла):

студентка II курсу, групи ПК-41мп

Домашенко Анна Володимирівна _____

Науковий керівник:

доцент, к.т.н.

Муравйов Олександр Володимирович _____

Консультант з розробка стартап-проектів:

Завідувач кафедри економічної кібернетики

д.е.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

доцент каф. ІВТ, к.т.н. доцент

Маркіна Ольга Миколаївна _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Юрій КИРИЧУК**

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Домашенко Анна Володимирівна

1. Тема дисертації «Система автоматизованого аналізу стану та контролю росту рослин», науковий керівник дисертації Муравйов Олександр Володимирович, к.т.н., доцент кафедри АСНК, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2025 р. № 4793-с

2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2025

3. Об'єкт дослідження: процес моніторингу та аналізу стану росту рослин на основі вегетаційних індексів

4. Вихідні дані: зображення рослин, що отримані в ближньому інфрачервоному та видимому діапазонах спектру.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналітичний огляд літературних джерел щодо методів оцінки стану рослин за вегетаційними індексами; дослідити існуючі системи моніторингу посівів; реалізувати програму для обробки, розрахунку вегетаційних індексів та їх інтерпретації; провести тестування розробленого програмного забезпечення на реальних зображеннях.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Системи контролю росту рослин; Вегетаційні індекси: розрахунок та

інтерпретація; Розробка програмного забезпечення; Блок-схема алгоритму програми; Тестування розробленої програми.

7. Орієнтовний перелік публікацій Домашенко А. В. Автоматизація аналізу стану та контролю росту рослин / А. В. Домашенко, О. В. Муравйов // XXI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»: збірник праць конференції, Київ, 10-11 грудня 2025 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка сартап-проєкту	Завідувач кафедри економічної кібернетики д.е.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського Бояринова Катерина Олександрівна		

9. Дата видачі завдання 01.09.2025

Календарний план

з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	При мітка
1.	Огляд літературних джерел	3 тижні	
2.	Розробка алгоритму роботи системи	2 тижні	
3.	Розробка програми	3 тижні	
4.	Експериментальна частина	3 тижні	
5.	Розробка сартап-проєкту	2 тижні	
6.	Оформлення пояснювальної записки та створення презентації	1 тиждень	

Студент

Анна ДОМАШЕНКО

Науковий керівник

Олександр МУРАВЙОВ

АНОТАЦІЯ

Дана робота присвячена розробці автоматизованої системи аналізу стану рослин на основі спектральних даних та основних вегетаційних індексів таких як NDVI, GNDVI, SAVI, EVI, VARI. Метою роботи є створення інструменту, що забезпечує обробку зображень рослинності, розрахунок спектральних показників та інтерпретацію отриманих результатів для оцінки стану сільськогосподарських культур.

Реалізована система забезпечує автоматизований розрахунок індексів, формування візуалізацій та генерацію узагальнених аналітичних результатів.

Створене програмне забезпечення дає змогу підвищити оперативність та точність оцінки стану рослинності, сприяє оптимізації використання ресурсів, своєчасному виявленню стресових факторів та прийняттю обґрунтованих агротехнічних рішень.

Ключові слова: автоматизована система, вегетаційні індекси, обробка зображень, діагностика, стан рослин.

Annotation

This work is dedicated to the development of an automated system for analyzing plant condition based on spectral data and fundamental vegetation indices such as NDVI, GNDVI, SAVI, EVI, and VARI. The goal of the study is to create a tool that enables vegetation image processing, calculation of spectral indicators, and interpretation of the obtained results to assess the state of agricultural crops.

The implemented system provides automated index calculation, visualization, and generation of summarized analytical results.

The developed software increases the speed and accuracy of vegetation condition assessment, supports the optimization of resource use, enables timely detection of stress factors, and assists in making informed agronomic decisions.

Keywords: automated system, vegetation indices, image processing, diagnostics, plant condition.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	11
1.1. Стан розвитку автоматизованих систем контролю росту рослин	11
1.2. Сучасні засоби контролю росту рослин	16
1.3. Методи діагностики стану рослин	19
1.4. Оптичні та спектральні методи оцінки стану рослин	24
1.5. Існуючі технічні рішення та сенсори для спектрального аналізу	34
1.6. Програмні засоби для обробки та аналізу даних	36
Висновки до розділу 1	42
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ РОЗРОБЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	44
2.1 Вибір камери для проведення дослідження	44
2.2 Блок-схема алгоритму	46
Висновки до розділу 2	52
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	53
3.1 Обробка та підготовка вхідного зображення	53
3.2 Блок роботи з індексами	54
3.3 Блок графічної візуалізації	56
3.4 Блок табличної візуалізації	58
3.5 Тестування програмного забезпечення та аналіз результатів	62

Висновки до розділу 3.....	71
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «PlantScan»	73
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту.....	73
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	78
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту.....	89
4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту та оцінювання його економічної ефективності.....	98
Висновки до розділу 4.....	104
ВИСНОВКИ.....	106

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІФХ – індукція флуоресценції хлорофілу

NPQ – Non-Photochemical Quenching (нефотохімічне гасіння)

NDVI – Normalized difference vegetation index (Нормалізований Диференційний Вегетаційний Індекс)

NDRE – Normalized difference red edge index (Нормалізований індекс червоного краю)

SPI – Standardized Precipitation Index (Стандартизований індекс опадів)

SPAD – Soil Plant Analysis Development (Розробка аналізу ґрунту та рослин)

LAI – Leaf Area Index (Індекс листової поверхні)

PAM – Pulse Amplitude Modulation (Амплітудна модуляція імпульсів)

SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index (Ґрунтовий Вегетаційний Індекс)

MSAVI – Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (Модифікований Ґрунтовий Вегетаційний Індекс)

EVI – Enhanced Vegetation Index (Удосконалений Вегетаційний Індекс)

ARI – Anthocyanin Reflectance Index (Індекс відбиття антоціанів)

GNDVI – Green Normalized Difference Vegetation Index (Зелений нормалізований індекс різниці рослинності)

ENVI – Environment for Visualizing Images (Середовище для візуалізації зображень)

VARI – Visible Atmospherically Resistant Index (Індекс видимості в атмосферних умовах)

ВСТУП

Потреба розвитку та покращенні методів у сфері сільського господарства зростає з кожним роком як в Україні, так і в світі загалом. Паралельно з розвитком інтелектуальних технологій, відбувається активне впровадження їх у процеси вирощування різних сільськогосподарських культур. Вони надають переваги, які за допомогою традиційних методів неможливо досягти, як точність, мінімізація рутинних процесів, зменшення витрат, економія ресурсів та збільшення прибутків. Одним з таких методів є застосування вегетаційних індексів, які неруйнівним методом дозволяють визначити етапи розвитку рослин, проблемні регіони, сплість плодів. Однією з переваг є простота їх розрахунку та інформативність особливо у зв'язку з підвищенням вартості ресурсів, зміною клімату особливого значення набувають технології, здатні забезпечити оперативне отримання достовірної інформації про стан рослин протягом усього періоду вегетації.

Незважаючи на існування різноманітних рішень у сфері агромоніторингу, більшість із них мають низку обмежень: складність використання, високу вартість, або обмежений набір функцій. Саме тому актуальним завданням є розробка доступної, гнучкої та інформативної системи, яка дозволить проводити комплексний аналіз стану рослинності.

Предметом дослідження виступають процеси та програмні засоби аналізу зображень рослинності, методи інтерпретації вегетаційних індексів, а також інструменти автоматизації моніторингу стану рослин.

Метою даної роботи є розробка автоматизованої системи аналізу та розрахунку вегетаційних індексів з подальшою інтерпретацією отриманих результатів. Це зробить можливим обробку інформації з досить великої

території насаджень з можливістю бачити процеси, які неможливо визначити ззовні та зробити можливим застосування превентивних дій з економією ресурсів та запобігання втрат.

За традиційними методами, людині необхідно було б обійти всю територію насаджень, іноді це можуть бути гектари, що для людини фізично не є можливим або надто трудомістким, під час огляду можуть бути завданні пошкодження рослинам і в будь-якому випадку оглянути кожну з них попросту не можливо.

Все сказане вище доводить актуальність теми дипломної роботи, оскільки сільське господарство, як і кожна сучасна сфера, дедалі більше потребує цифрових технологій, які здатні забезпечити оперативний, точний та масштабований моніторинг стану культур на різних етапах їхнього розвитку, використання вегетаційних індексів і їх подальший аналіз та оцінка є інформативним і точним інструментом для моніторингу розвитку сільськогосподарських культур.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1. Стан розвитку автоматизованих систем контролю росту рослин

Призначенням автоматизації є полегшення або взагалі заміна роботи людини. Кожна сучасна система може мати акцент на різні параметри, але можна виділити основні компоненти та функції. Датчики первинної інформації, це можуть бути датчики вологості, температури, освітленості, концентрації рН. Контролер виконує збір даних, обробку сигналів та відповідно до заданих алгоритмів та отриманих даних приймає рішення. Виконавчі механізми дозволяють досягти необхідних умов, наприклад, лампи освітлення, вентиляторів. В деяких системах є модуль зв'язку що передає отримані дані на сервер або мобільний пристрій. Програмне забезпечення дозволяє зберігати, візуалізувати інформацію про стан рослин та додатково про стан системи, наприклад, чи достатньо води в резервуарі чи немає збоїв [1].

Порівняно з декількома десятиліттями тому з'явилося багато методів оцінки. Якщо брати перші системи, то загалом вони були орієнтовані на вимірювання параметрів середовища без приділення уваги стану самих рослин. Зараз використовують методи які дозволяють це, наприклад, комп'ютерний зір дозволяє аналіз кольору, форми та кількості листя, спектральні методи вимірюють коефіцієнти відбиття, інтегровані IoT-системи дозволяють передавати дані і згодом їх обробляти за допомогою штучного інтелекту.

Залежно від методики дослідження існує наступна класифікація приладів:

1. Флуориметри – визначають концентрації речовини за інтенсивністю флуоресценції, що виникає при опромінюванні речовини світловим випромінюванням певної довжини хвилі, наприклад, ультрафіолетовим промінням, й після поглинання нею енергії збуджуючого випромінювання (Рис. 1).

Це метод аналізу, який базується на визначенні залежності між інтенсивністю флуоресценції аналізованої проби та концентрацією речовини.

Безпосередньо для аналізу стану рослин використовується метод індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ). Він дозволяє аналізувати роботу фотосинтетичного апарату [2].

Флуоресценцію хлорофілу – слабе світіння, яке виникає, коли рослина поглинає світло і не всю енергію використовує для фотосинтезу.

Принцип роботи: Листок освітлюють певним світлом → хлорофіл випромінює флуоресценцію → прилад її вимірює.

Цей підхід дає змогу виявляти стресові стани рослин на ранніх стадіях, задовго до появи видимих симптомів. Використовуючи цей метод можна діагностувати стреси, спричинені різними факторами:

- посуха та водний дефіцит;
- нестача або надлишок елементів живлення;
- вплив хвороб та шкідників;
- дія гербіцидів та інших агрохімікатів;
- температурні стреси (високі та низькі температури);
- інші несприятливі умови довкілля.

ІФХ-діагностики базується на використанні спеціалізованого обладнання – багатопараметричні польові аналізатори, що дозволяють одночасно вимірювати широкий спектр показників флуоресценції хлорофілу, такі як: ефективну квантову ефективність, нефотохімічне

гасіння (NPQ) та інші. Здійснює оцінку відносного вмісту хлорофілу та інших важливих фізіологічних параметрів. Такий детальний аналіз забезпечує глибоке розуміння стану рослин і є незамінним для дослідницьких цілей та точного моніторингу.

Для оперативного моніторингу великих площ та швидкого скринінгу застосовуються високопродуктивні портативні флуориметри. Ці компактні прилади дозволяють швидко вимірювати ключові параметри флуоресценції забезпечуючи оперативну оцінку загального фізіологічного стану рослин та виявлення стресових реакцій безпосередньо на полі [3].



Рис. 1. Флуориметри

2. Рефлектометри – вимірюють відбиття світла від поверхні об’єкта на різних довжинах хвиль. Діагностику стану рослин здійснюють аналізом, яку частину світла листки поглинають і яку відбивають, що безпосередньо пов’язано з їхнім фізіологічним станом (Рис. 2).

Показують:

- Вміст хлорофілу (NDVI, NDRE, SPI, SPAD-аналог)
- Азотний та пігментний статус рослин

- Стреси, що вже викликають помітні зміни кольору/структури
- Погодні чи хімічні пошкодження



Рис. 2. Рефлектометри

3. LAI-метри (Leaf Area Index) – це прилади для вимірювання LAI – площі листової поверхні на одиницю площі ґрунту (Рис. 3).

$LAI = \text{площа всіх листків} / \text{площа земної поверхні під ними}$

Наприклад, $LAI = 3$ означає, що над кожним квадратним метром землі є 3 м^2 листової поверхні.

LAI-метри зазвичай вимірюють:

- пропускання світла через крону, або
- розсіювання та затінення,
- потім розраховують індекс LAI.

Для чого використовують:

- оцінка густоти та здоров'я посівів;
- аналіз структури лісу;
- моделювання фотосинтезу та продуктивності;
- контроль росту сільськогосподарських культур;
- дослідження взаємодії світла і рослинного покриву.

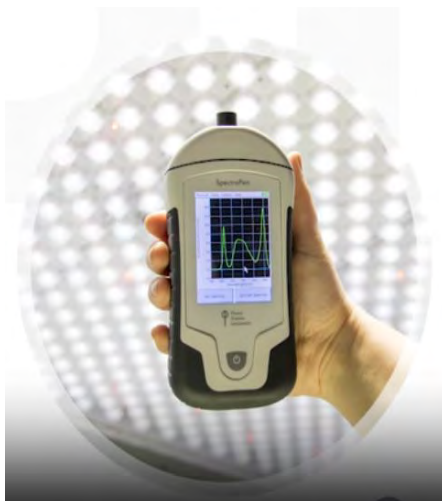


Рис. 3. LAI-метри

Таблиця. 1. Порівняння можливостей приладів діагностики стану рослин

Назва приладу	Об'єкт вимірювання	Принцип роботи	Призначення
Флуориметр	Флуоресценцію хлорофілу	Світлове збудження та реєстрація флуоресценції	Оцінка фотосинтезу
Рефлектометр	Відбиття світла в спектральних каналах	Аналіз спектральних індексів	Оцінка хлорофілу
LAI-метр	Площу листків на площу ґрунту (LAI)	Передача/поглинання світла кроною	Оцінка покриття

1.2. Сучасні засоби контролю росту рослин

Наведемо конкретні приклади систем які вже широко використовуються у світі:

1. PlantEye (Phenospex, Нідерланди) – унікальний датчик для рослин, який поєднує 3D-зір та мультиспектральну візуалізацію. Він знімає рослини неруйнівним способом і надає точні та об'єктивні параметри рослин у режимі реального часу (Рис. 4).



Рис. 4. Planteye

PlantEye створює 3D-модель рослини, лотка, ділянки або навіть цілого поля. Модель зберігається у відкритому форматі PLY. Модель рослини побудована з точок, які називаються 3D-хмарою точок (Рис. 5). Кожна точка містить таку інформацію: координати x , y , z у просторі відбиття в червоному, зеленому, синьому та ближньому інфрачервоному діапазонах відбиття 3D-лазера (940 нм) [4].

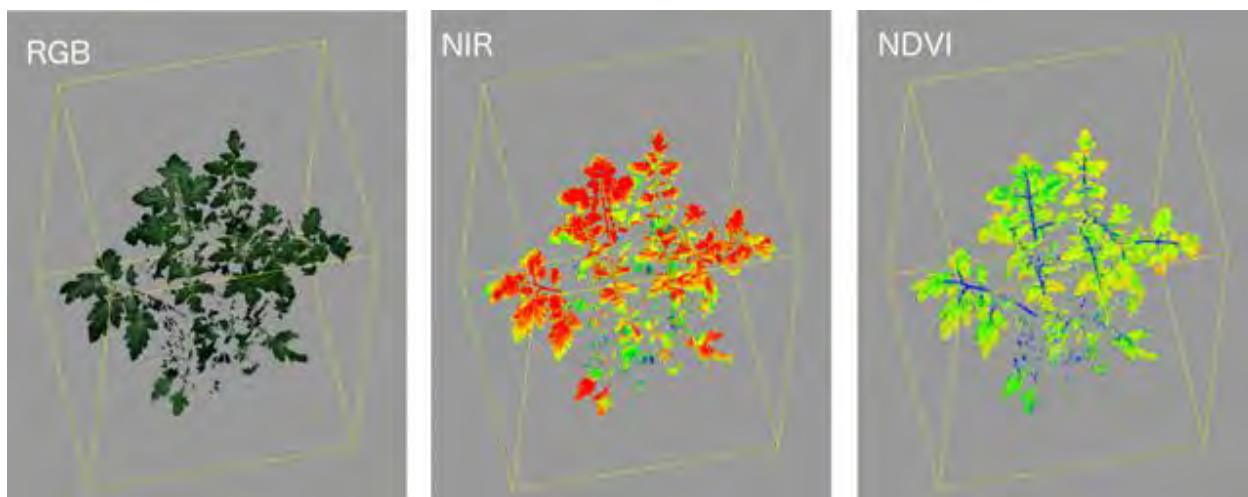


Рис. 5. 3D-точкова модель з різною спектральною інформацією про рослину томата FluorPen (PSI, Чехія)

2. FluorPen FP 110 – це портативний флуориметр РАМ з батарейним живленням, який дозволяє швидко і точно вимірювати параметри флуоресценції хлорофілу в лабораторії, теплиці або в польових умовах (Рис. 6). Його можна ефективно використовувати для вивчення фотосинтетичної активності, виявлення стресу, тестування гербіцидів або скринінгу мутантів. Доступна ціна і просте управління двома кнопками роблять FluorPen ідеальним інструментом для досліджень і викладання фотосинтезу.



Рис. 6. FluorPen (США)

3. PAR-FluorPen FP 110 – це розширена версія FluorPen FP 110, яка має вбудований світломір для прямого цифрового зчитування фотосинтетично активного випромінювання (PAR) в діапазоні від 400 до 700 нм .Цей прилад лише для вимірювання стану листя. Листок обережно фіксується всередині камери для візуалізації на фіксованій відстані та під фіксованим кутом до камери та джерела освітлення. Поєднуючи апаратне забезпечення проксимального гіперспектрального іміджера з передовим програмним забезпеченням для обробки зображень [5].

4. LeafSpec може досягти вищого співвідношення сигнал/шум для вимірювання листя, виявляючи поживні речовини та хімічний стрес рослин за кілька днів до того, як досвідчені фермери або дослідники зможуть візуально побачити ознаки. Якщо брати загалом то в даних системах є деякі недоліки, як низька точність вимірів при зміні освітлення, в залежності від видів рослин (Рис. 7).



Рис. 7. LeafSpec (США)

1.3. Методи діагностики стану рослин

Для ефективного контролю росту рослин, окрім додавання необхідних речовин в найбільш сприятливі моменти в потрібній кількості, необхідно також вчасно визначити момент коли рослина починає захворювати, коли в неї починає бути нестача поживних речовин, хоч рослини і можуть бути одного виду з схожими потребами проте в деяких можуть бути індивідуальні потреби, наприклад, одна рослина потребує менше води чим інша і їм потрібно зміни умов, інакше можливий варіант що рослина загине, деякі методи дозволяють визначити ознаки стресу ще до моменту проявлення зовнішніх ознак, за якими б досвідчена людина могла визначити незадовільний стан [6].

В розділі 1.1. було розглянуто основні принципи роботи приладів, які здійснюють діагностику стану рослин, їх переваги і недоліки, зараз більш детально зупинимось на методах діагностики.

Методи можна розділити на:

- контактні;
- безконтактні.

Для перших необхідно фізичне або хімічне вимірюванні параметрів рослини, наприклад, вологоміри ґрунту, листів. Перевага цих методів, що отримуються досить точні результати, проте займає більше часу, оскільки потрібно брати зразок, час на його обробку, що на відміну від безконтактних не дозволяє отримати результат в реальному часі.

Безконтактні ж методи ґрунтуються на аналізі оптичних, теплових характеристиках, сюди можна віднести фотометричні методи, спектральні та візуально-аналітичні, тепловізійні. Їх перевагою є те, що вони дають можливість провести оцінку дистанційно. Також можна однією з переваг назвати що вони дозволяють проводити аналіз не тільки локальної

ділянки чи окремої рослини, а і великих площ одночасно, для прикладу контактний метод визначення вологості ґрунту на певній ділянці, для цього необхідно вибрати територію та помістити датчик у ґрунт, безконтактними методами можна вимірювати температуру листків окремих рослин, а можна також аналізувати території стану рослинності за допомогою знімків з дронів.

Розглянемо приклади основних контактних методів.

Першим варто назвати біохімічний метод який базується на тому, що проводиться вимірювання концентрації хлорофілу, води, азоту. Для цих вимірів відбувається безпосередня взаємодія з листком, соком рослини. Наприклад, використовуються сенсори які визначають вміст азоту за рівнем хлорофілу як от spad-502plus є прикладом одного з найзручніших для контактних методів. Все що необхідно потрібно прийти до обраної рослини, затискачем на приладі затиснути частину листя, почекати 2 секунди та отримати індексний вміст хлорофілу, не потрібно брати зразок рослини який потім доведеться зруйнувати щоб провести необхідні виміри (Рис.8).



Рис. 8. Спосіб застосування spad-502plus

Було наведено найпростіший контактний метод і прилад яким вимірюється дає швидкий та чіткий результат, але є варіанти вимірювань які задіюють більше кроків, наприклад, вимірювання хлорофілу, каротиноїдів та інших компонентів за допомогою Thermo Fisher Evolution 60S, для цього спочатку подрібнюють листок, додаються розчинники і заливається в бак пристрою де відбуваються вже необхідні виміри. Результат отримується не миттєво, зразок знищується, пристрій не є портативним.

Спектральні методи працюють завдяки залежності коефіцієнта відбиття від довжини хвилі світла. На цьому базуються різні індекси наприклад NDVI. Використовується DJI Phantom 4 Multispectral для прикладу, його параметри дозволяють йому проводити 27 хв в повітрі, має вбудовану систему стабілізації щоб забезпечити більш точні дані, також має інтегрований спектральний датчик сонячного світла, що дозволяє узгоджувати дані в залежності від часу дня, також є можливість перемикатися між RGB та NVDI каналами (Рис. 9). З таким підходом людина мінімально витрачає часу отримує достатньо точні результати на великих ділянках а не з однієї рослини, з недоліків можна виділити що хоч і вбудовано спектральний датчик, але все рівно може бути похибка вимірювання [7].



Рис. 9. DJI Phantom 4 Multispectral

Тепловізійні методи вимірюють температуру наприклад на поверхні листя, це дозволяє визначити недостатню кількість води, оскільки при нестачі води рослина зменшує транспірацію, і відповідно температура підвищується (Рис. 10).

Цей метод тільки нещодавно почав досліджуватися в агрокультурі, наприклад Vieira and Ferrarezi в 2021 році досліджували водний стрес в цитрусових рослин в теплиці, в результаті було отримано, що в рослин в яких була нестача води, температура їх крон була вищою, великим плюсом цього методу що проводиться аналіз багатьох рослин одночасно, але недоліком даного методу є те що на результат зображення може впливати фонові об'єкти, але якщо поєднати спектральні зображення та тепловізійні можна отримати набагато більш точні результати завдяки алгоритмам сегментації можна маскувати фоновий тепловий шум і отримувати більш точні результати температури [8].



Рис. 10. Приклад застосування тепловізійного методу на рослині з пелюстками з водним стресом

Візуально-аналітичні це і є ті методи які часто використовують комп'ютерний зір. Комп'ютерний зір дозволяє аналізувати, інтерпретувати візуальну інформацію, як відео, фото, за допомогою

алгоритмів комп'ютерного навчання, цю систему можна вчити, тим самим удосконалюючи її роботу та дозволяє отримувати більш точні результати [9].

Основними техніками є класифікація зображень, відстеження об'єктів на відео, виявлення об'єктів. Найбільш поширеним є використання згорткових нейронних мереж для розбиття зображень на менші фрагменти, що дозволяє розпізнавати форму, кольори, текстури, краї, що аналізує зображення і дозволяє присвоїти мітки

Завдяки цим можливостям, можна обробляти великі обсяги даних з досить гарною точністю, тому уже відбулося інтегрування комп'ютерного зору щоб могли відстежувати обличчя, що дозволяє покращувати такі сфери як охорона здоров'я, автономне водіння. Маючи ряд переваг даний метод почали інтегрувати в розвиток сільського господарства.

Можна проводити сортування, що включає в себе класифікацію врожаю за різними параметрами якості як стиглість, колір, форма, розмір, наприклад, можна проаналізувати рослину і її плоди чи є серед них псовані, зелені тощо (Рис. 11).

Також за допомогою комп'ютерного зору можна визначати бур'яни, що неможливо за допомогою жодного іншого вище описаного методу, але є не менш важливим чим визначення стану рослини, оскільки бур'ян забирає на себе частину поживних речовин та заважає росту рослини, що веде до їх ослаблення та згодом до захворювання. Маючи інформацію про точний вид бур'янів, фермери можуть коригувати додавання необхідних пестицидів. Відповідно є можливість визначати хвороби рослин за допомогою зовнішніх ознак, хоч завдяки деяким методам можна визначати, що рослина починає захворювати ще до появи зовнішніх ознак, але комп'ютерний зір не має можливості аналізувати відбиття світла, але може проаналізувати проявлення захворювання на ранніх

стадіях, що дозволяє підібрати необхідні рішення для різних рослин. Недоліком цього методу є те, що є неточності визначення через зовнішнє середовище, на початкових стадіях навчання [10].



Рис. 11. Приклад виявлення ознак захворювання у рослини за допомогою комп'ютерного зору

1.4. Оптичні та спектральні методи оцінки стану рослин (NDVI, EVI, ARI, SAVI, ін.)

Для неруйнівної оцінки стану рослин були розроблені вегетаційні індекси, які є числовими показниками, що оцінюють стан, кількість та здоров'я рослинності на основі спектрального відбиття світла рослинами в різних діапазонах [11].

Їх використовують у дистанційному неруйнівному контролі для моніторингу сільського господарства, лісів, екології та кліматичних змін.

Існують сотні вегетаційних індексів і щороку їхня кількість збільшується.

Їх можна розбити на декілька груп:

1. Класичні – базуються на різниці NIR та Red (NDVI, DVI, GNDVI та інші).

2. Індекси зі зменшенням впливу ґрунту (soil-corrected) призначені для територій із розрідженою рослинністю (SAVI, MSAVI).

3. Індекси зі зменшенням атмосферного впливу – компенсують ефекти розсіювання та аерозолів (EVI).

4. Індекси, чутливі до пігментів (хлорофіл, антоціани, каротиноїди) – використовуються для біохімічного аналізу рослин (ARI).

5. Теплові та комбіновані індекси – використовують теплове випромінювання (TVI).

NDVI (Normalized difference vegetation index) – це показник здоров'я рослини, що визначається тим як рослина відбиває різні світлові хвилі. Людське око рослина видається зеленою через пігмент хлорофіл, який поглинає червоні хвилі, що призводить до фотосинтезу, і рослина росте. Здорова рослина активно поглинає червоне світло і відбиває ближнє інфрачервоне, а хвора з точністю до навпаки. Щоб зрозуміти стан рослини, потрібно порівняти значення поглинання та відбивання червоного та інфрачервоного світла, тут в нагоді і стає NDVI. Це один з найпоширеніших методів моніторингу відсотка зеленого покриття на певній території. Оскільки це коефіцієнт, цей індекс не залежить від різниці в умовах освітлення, нахилу, пори року тощо, а тому підходить для моніторингу врожаю протягом усього вегетаційного періоду [12]

Формула для його розрахунку:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

де, NIR – коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (700-900 нм); Red – коефіцієнт відбиття у червоному діапазоні (600-700 нм).

Є три сценарій використання даного індексу: на початку, в середині та в кінці вегетаційного періоду.

На початку сезону показує наскільки добре рослина пережила зиму

Якщо NDVI нижче 0,15, найімовірніше, всі рослини в цій частині поля загинули. Зазвичай ці цифри відповідають:

- оголеному ґрунту, стерні;
- мінімальній або відсутній рослинності;
- початку проростання або дуже поганому стану посівів.

0,15-0,2 також є низьким значенням, яке означає:

- дуже рання рослинність;
- низька біомаса, слабкий розвиток рослин;
- ґрунт ще домінує в відбитті.

Це може свідчити про те, що рослини почали зимувати на ранній фенологічній стадії (проростання), до кущіння (Рис. 12).

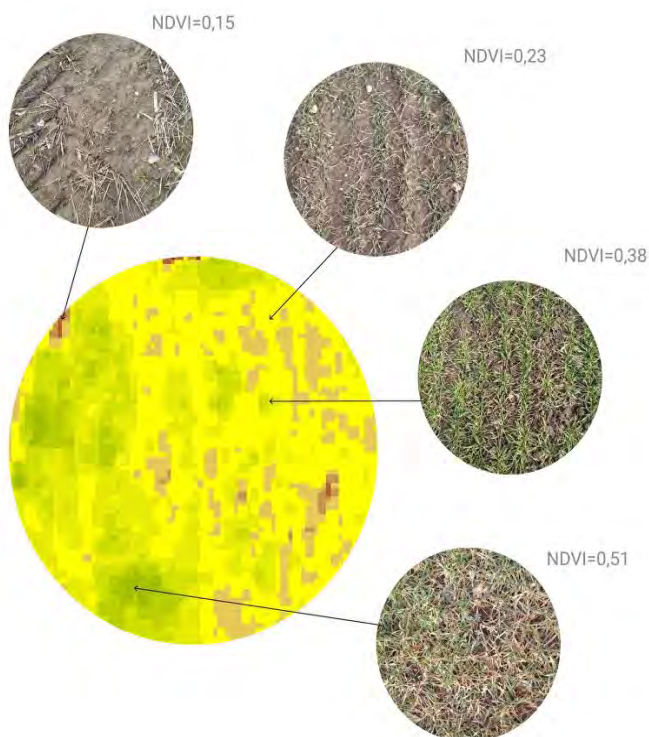


Рис. 12. Значення NVDI та відповідні стани рослин

У цей період на полі ще мало зеленої біомаси. Це нормальні значення для ранньої весни або на початку вегетації.

0,2-0,3 – відносно хороше значення.

Даний діапазон значень означає:

- початок активної вегетації;
- рослини вже закривають частину ґрунту;
- біомаса формується, але ще не максимальна.

Ймовірно, рослини увійшли у фазу куціння і відновили вегетацію.

0,3-0,5 – досить хороше значення.

Проте слід пам'ятати, що високі значення NDVI на початок сезону можуть свідчити про те, що рослини перезимували на пізній фенологічній фазі. Якщо супутникове зображення було зроблено до відновлення вегетації, то необхідно проаналізувати зону і після відновлення вегетації [13].

Значення вище 0,5 є ненормальним для після зимового періоду, оскільки показник сигналізує про високу біомасу, що практично не можливо на початку періоду вегетації. Краще самостійно перевірити цю польову зону (Рис. 13).

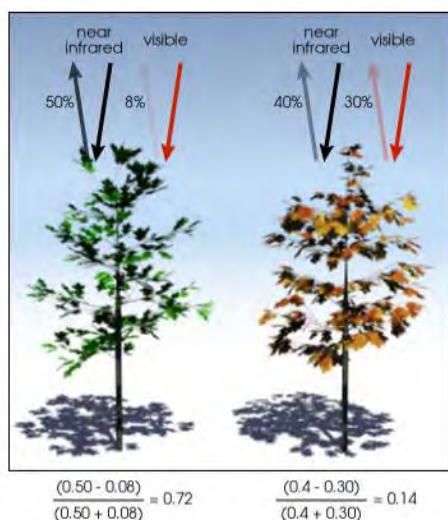


Рис. 13. Приклад застосування формули розрахунку NDVI

Може означати:

- середній стан посівів;
- різні стадії розвитку на полі;
- початок наростання листової маси.

0,60-0,75 – хороший стан рослин.

Характеризує:

- щільний і здоровий листковий покрив;
- рослини у фазі активної вегетації.

Зазвичай саме це типове значення у середині сезону для більшості культур (пшениця, кукурудза, соя, соняшник)

0,75-0,90 – дуже високий NDVI (ідеальні посіви)

Сигналізує про:

- максимальну зеленість, рослини здорові й рівномірні;
- гарне зволоження, живлення, відсутність стресів;
- скоріше всього площа засіяна культурами з дуже щільною та зеленою масою.

Але надто високі значення інколи можуть означати забур'яненість, варто перевірити ділянку.

Використання індекс NDVI, допомагає виявити ділянки з низьким, середнім і високим індексом рослинності, а відповідно створити карти для змінного внесення азоту, фосфорних і калійних добрив.

Оптимальна схема внесення азоту наступна:

- якщо індекс рослинності в районі високий, дозу добрив слід зменшити до 10–30% від середньої норми;
- якщо індекс рослинності середній, дозу добрив слід збільшити до 20–25% від середньої норми;
- якщо індекс рослинності низький, спочатку потрібно визначити причину цього.

Наприкінці сезону індекс NDVI допомагає визначити, які поля готові до збору врожаю – чим нижчий індекс, тим ближче частина поля до стадії дозрівання. Оптимальне значення індексу в цьому випадку буде нижче 0,25 [14].

Одним із недоліків NDVI є те, що індекс втрачає чутливість, коли рослина досягає певного порогу розвитку. Іншими словами, якщо рослина розвивається дуже активно, стає неможливо відрізнити аномально зелену рослину від «нормально» зеленої.

GNDVI модифікований NDVI, для його розрахунку використовується зелений канал (Green) замість червоного (Red) (Рис. 14).

Він більш чутливий до вмісту хлорофілу та фотосинтетичної активності рослин [15].

$$\text{GNDVI} = (\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green}) \quad (2)$$

де, Green - коефіцієнт відбиття у зеленому діапазоні (540–570 нм)

Заміна червоного каналу на зелений робить GNDVI більш чутливим до:

- вмісту хлорофілу, оскільки рослини активно відбивають зелені світлові хвилі, тому GNDVI краще показує зміни пов'язані з хлорофілом;
- стану рослин, оскільки на ранніх стадіях вегетації, коли рослинний покрив невеликий NDVI іноді “слабко реагує”, у таких умовах працює краще GNDVI;
- стресів рослинності, пов'язаних із: нестачею азоту, водним стресом, хворобами, дефіцитом поживних речовин.

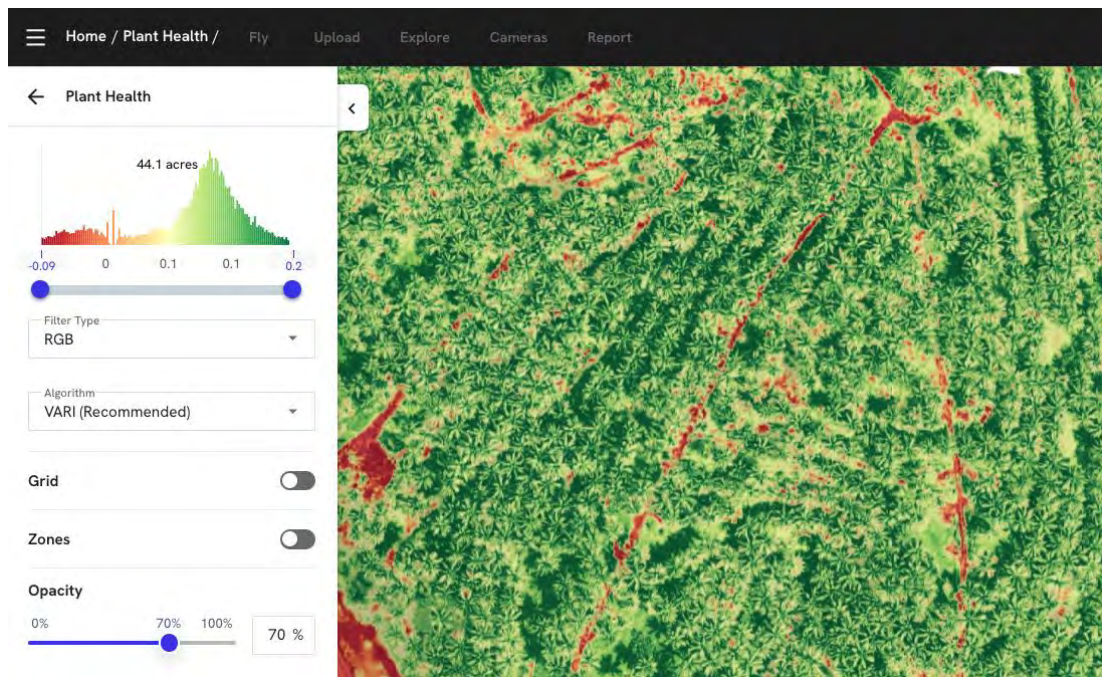


Рис. 14. Приклад GNDVI візуалізації

EVI – це індекс, який кількісно оцінює зеленість і життєздатність рослинності шляхом аналізу відбиття рослин світла певних довжин хвиль (Рис. 15). Як і NDVI, EVI використовує дані з видимої та ближньої інфрачервоної (NIR) частин спектра. Його створила команда NASA для вирішення проблем класичного NDVI, які проявляються в густій рослинності та при наявності атмосферних завад, тому EVI також включає синю смугу, що допомагає зменшити атмосферні перешкоди та підвищити чутливість у районах з густою рослинністю а також спеціальний параметр L, який стабілізує оцінку [16].

$$EVI = G * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C1 * Red - C2 * Blue + L)} \quad (3)$$

де, NIR – відбивання в ближньому інфрачервоному діапазоні; Red – відбивання в червоному діапазоні; Blue – відбиття в синьому діапазоні; G – коефіцієнт посилення (зазвичай встановлюється на 2,5); C1 і C2 –

коефіцієнти для корекції атмосферного опору (зазвичай встановлюються на 6 і 7,5 відповідно); L – корекція фону крони (часто встановлюється на 1).

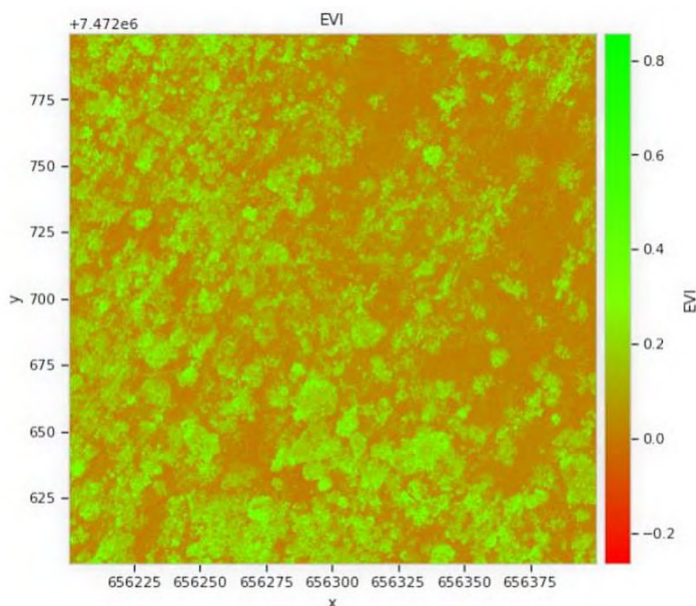


Рис. 15 Приклад EVI візуалізації

Якщо значення EVI:

- < 0 – вода, хмари, технічні шумові ділянки;
- 0-0,1 – голий ґрунт, дуже слабка рослинність
- 0,1-0,2 – розріджені посіви
- 0,2-0,4 – середня біомаса, активний ріст
- 0,4-0,6 – здорова, інтенсивна рослинність
- 0,6 – дуже густа зелена біомаса або ліс

Оскільки NDVI і EVI дуже схожі, варто зазначити що NDVI широко використовується протягом десятиліть і базується на простому співвідношенні червоного та ближнього інфрачервоного діапазонів світла. Хоча NDVI є ефективним для багатьох застосувань, він має деякі обмеження, які можуть впливати на його точність та надійність [17].

ARI (Anthocyanin Reflectance Index) – скорочення індексу відбиття антоціанів.

Антоціани – це водорозчинні пігменти, які містяться у великій кількості в новоутворених листках та листках, що старіють. У слабкій рослинності міститься вища концентрація антоціанів, тому цей індекс є одним із показників стресу рослинності.

$$ARI = \left(\frac{1}{R_{550}} - \frac{1}{R_{700}} \right) \quad (4)$$

де, R550 – відбиття у зеленій зоні (550 нм); R700 – відбиття у червоній зоні (700 нм).

Вегетаційний індекс, стійкий до атмосферних впливів у видимому діапазоні VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) – це вегетаційний індекс, який розраховується лише з видимих каналів (Red, Green, Blue) і майже не залежить від атмосферного впливу. Він особливо корисний там, де немає інфрачервоних каналів, наприклад, у знімках із звичайних камер, дронів або RGB-сенсорів, оскільки використовує звичайні RGB зображення для аналізу [18].

$$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red - Blue} \quad (5)$$

де, Green – відбита рослинністю інтенсивність у зеленому діапазоні (близько 540–570 нм); Red – відбита інтенсивність у червоному діапазоні (близько 620–700 нм); Blue – відбита інтенсивність у синьому діапазоні (близько 450–510 нм).

Зелений канал – це найсильніший відбитий видимий сигнал від здорової рослинності, оскільки хлорофіл сильно поглинає червоне і синє світло, але значно менше поглинає зелене, тому листя виглядає зеленим.

Рослини активно поглинають світло саме в червоній частині спектра для фотосинтезу, тому низьке Red (бо майже все поглинається) свідчить про здорову рослинність.

Синя частина спектра також дуже сильно поглинається хлорофілом, але, на відміну від червоного синє світло набагато більше розсіюється атмосферою, чутливе до тіней та більше залежить від стану атмосфери (дим, пил, туман). Тому його включають у знаменник, щоб зменшити вплив атмосферного розсіювання та нерівномірності освітлення [19].

Blue використовується як коректор, воно “стабілізує” індекс.

Індекс рослинності, скоригований на вплив ґрунту SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) – це індекс, що компенсує вплив ґрунтового фону на значення рослинності, особливо у зонах з розрідженим рослинним покривом.

Він був розроблений, щоб покращити NDVI у випадках, коли відкритий ґрунт сильно впливає на відбиття.

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + Ld)} * (1 + Ld) \quad (6)$$

де, Ld – коефіцієнт корекції ґрунту.

Коефіцієнт Ld залежить від густоти рослинності, чим густіша рослинність тим менший Ld, при значенні Ld = 0, цей індекс по суті є NDVI. Значення Ld = 0,5 універсальний баланс для більшості типів ландшафту [20].

1.5. Існуючі технічні рішення та сенсори для спектрального аналізу

Використовуються супутникові знімки та з набуттям популярності дронів також з'явилися дроніві технології, вони дозволяють оглянути великі площі посівів, надаючи дані потім для обробки зображень. Є декілька різновидів сенсорів: основними з них є мультиспектральні сенсори, гіперспектральні сенсори. Мультиспектральні та гіперспектральні сенсори іноді вживаються як синоніми, проте це не відповідає дійсності, мультиспектральна та гіперспектральна візуалізація мають перевагу над звичайними методами машинного зору, де використовується світло з видимого спектру, а саме 400-700нм, гіперспектральна зйомка ж має інформацію з ширшої частини електромагнітного спектру, може починатися з ультрафіолетового світла і бути до ближнього червоного або короткохвильового інфрачервоного [21].

Мультиспектральні як вже було зазначено має схожість з гіперспектральними, але їх відмінність в тому, що вони можуть реєструвати різні діапазони, гіперспектральні мають більше 100 діапазонів, мультиспектральні значно менше, що і дозволяє гіперспектральній візуалізації надавати більше детальні результати (Рис. 16).

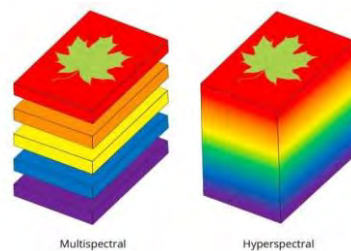


Рис. 16. Візуалізація різниці між мультиспетральним і гіперспектральним методами

Якщо їх порівнювати то варто зазначити що основною перевагою гіперспектральних сенсорів є більша точність, але вони коштують набагато більше. Зазвичай для продажу відразу пропонуються саме камери, для встановлення відразу на дрон:

1. Мультиспектральні камери: Parrot Sequoia, P4 Multispectral – DJI (Рис. 17).



Рис. 17. Parrot Sequoia

2. Гіперспектральні камери: Specim IQ, Resonon Pika L (Рис. 18).
3. Цінова різниця на прикладі Parrot Sequoia-\$1,200.00 та Specim IQ -\$19,995 .



Рис. 18. Specim IQ

1.6. Програмні засоби для обробки та аналізу даних

Важливим етапом є опрацювання зібраних даних. Приміром з датчиків було отримано результати протягом певного періоду, також отримано зображення рослин, всі ці дані можуть дати повну картину про поточний стан, отримати статистику та відповідно спрогнозувати подальший розвиток та на що варто звернути увагу.

Власноруч опрацювати такі дані майже неможливо і для цього необхідно багато часу та відповідно можливо помилитися при розрахунку. В такому випадку в нагоді стануть різні програмні засоби, що мають широкий спектр можливостей [22].

Оскільки з зображень можна проаналізувати поточний стан рослини за кольором, за кількістю листків, висотою пагону, можна навіть якщо було знято за допомогою гіперспектральних камер, визначити індекси як NDVI. Для їх обробки можна використовувати Matlab, використовуючи, наприклад, Image Processing Toolbox, матлаб легко може працювати з формулами і ефективно обробляти зображення, можна також з отриманих даних будувати діаграми.

Для обробки зображень має такий функціонал: аналіз зображень, сегментація зображень, поглиблене навчання в обробці зображень, гіперспектральна обробка зображень. Тепер більш детально про кожен вид та як він може стати в пригоді для аналізу стану росту рослин.

Під час аналізу зображень відбувається вилучення необхідної інформації з зображення, наприклад пошук певних форм, обчислення кількості об'єктів, розпізнавання кольорів, що відповідним чином особливо може бути корисним для плодоносних рослин, для прикладу візьмемо грядку огірків, де за допомогою лише зображення можна виявити кількість плодів, колір рослини, кількість листя (Рис. 19 а). Також щоб провести подальшу обробку та розрахунок параметрів

певного об'єкта, за допомогою методів Matlab можна визначати необхідні контури з зображення (Рис. 19 б). Інша ситуація коли неможливо сфотографувати лише одну необхідну рослину щодо якої буде проводитися аналіз, на фоні може бути багато інших предметів, і при аналізі вони будуть впливати на точність, тому щоб програма могла працювати лише з ним потрібно щоб вона спочатку його знайшла та виокремила серед інших, Matlab і для такого випадку має потрібний функціонал [23].



Рис. 19 Приклади роботи аналізу зображень: а) Знаходження певного об'єкта на зображенні серед інших предметів б) Визначення контурів

Сегментація зображення включає в себе поділ зображення на частини або області. В більшій мірі базується на характеристиках пікселів. Для прикладу коли беруться декілька сусідніх пікселів і між їхніми значеннями є велика різниця, що вказує на краї, наприклад, пікселі плоду перцю на фоні ґрунту чи стебла, і тоді можна проводити аналіз плоду виділивши його контури. Є різні підходи, існує метод “Сегментації всього” за регіоном інтересу, тут використовуються нейронні мережі щоб сегментація була точною і без навчання, користувачеві необхідно вибрати регіон інтересу прямокутником і це буде слугувати підказкою для сегментації, як на прикладу серед перцю та часнику вибирається певний об'єкт без захоплення інших (Рис. 20 а) [24].

Також корисним в деяких випадках може бути сегментація через колірний простір $L^*a^*b^*$, який можна розшифрувати за його складниками: канал яскравості (L^*), канал забарвлення (a^*) що визначає місце розташування кольору по осях червоного-зеленого, каналу забарвлення (b^*) що визначає місце розташування кольору по осях синього-жовтого. Що допоможе також виділити необхідні кольори плодів чи стебел (Рис.20 б).

Гіперспектральна обробка зображень за допомогою вбудованих функцій можна обробляти дані, можна виявляти аномалії, обчислення різних індексів (Рис. 21).

Гіперспектральні зображення надають інформацію про склад та якість матеріалів, що є чудовим прикладом неруйнівного аналізу, наприклад, для контролю зрілості фруктів без потреби в проведенні лабораторних аналізів на зразках [25].

Для прикладу, трое сортів винограду, відбір зразків ягід почався один-два тижні після дозрівання та перед збором врожаю влітку. Коли ягоди дозрівають їх щільність відповідне також зростає через вміст цукру

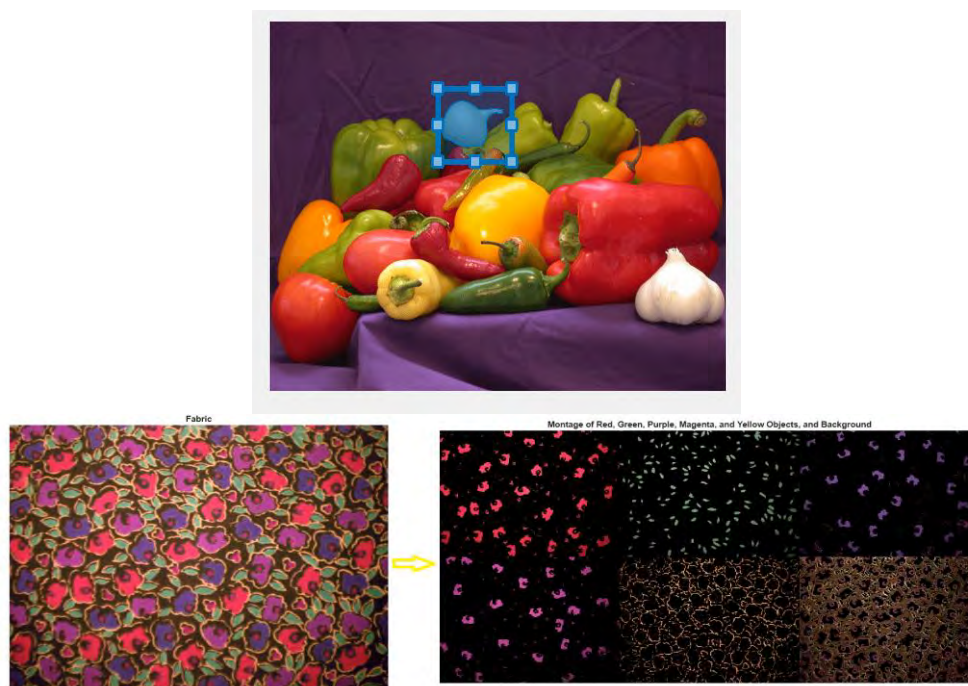


Рис. 20 Приклади застосування сегментації: а) Модель «Сегментувати все» б) Сегментація за кольором з використанням колірного простору $L^*a^*b^*$

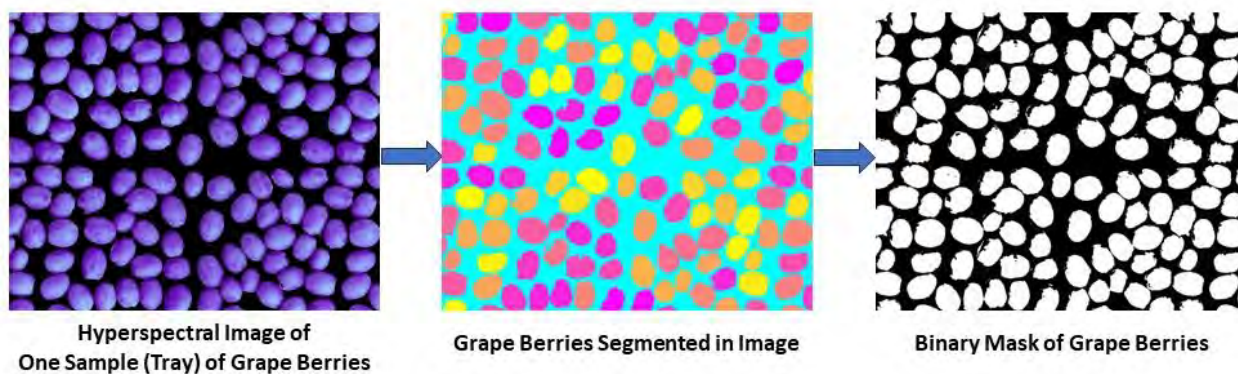


Рис. 21 Обробка гіперспектрального зображення

Їх розклали на підносі так щоб ягода не затуляла одна одну щоб камера могла зробити якісне фото. Далі відбувається сегментація фото та відповідно будується графік за отриманими значеннями по осі X пишеться довжина хвилі в діапазоні від видимого до ближнього

інфрачервоного світла, по осі У значення наскільки ягода відбиває світло (Рис. 22) [26]

Поглиблене навчання використовує нейронні мережі, іноді можуть використовуватися камери які роблять неякісні зображення і з них важко отримати корисну інформацію, в такому випадку методи поглибленого навчання дозволяють прибрати шуми з зображення (Рис. 23)

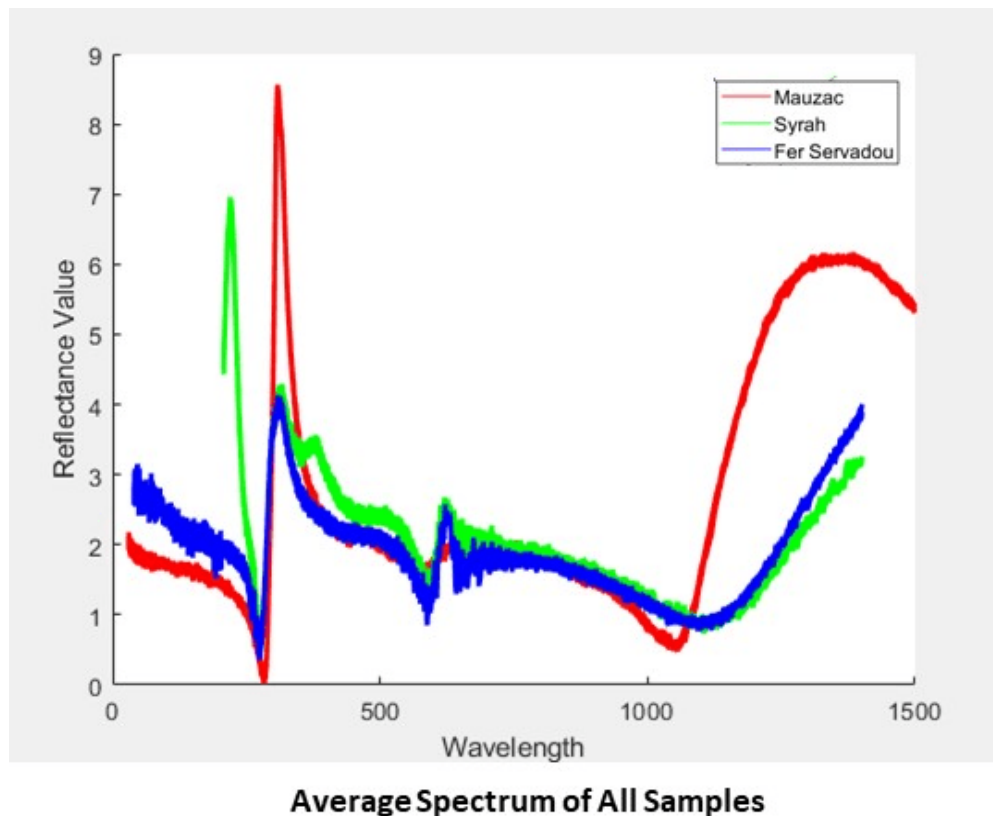


Рис. 22 Аналіз спілості ягід за отриманими значеннями

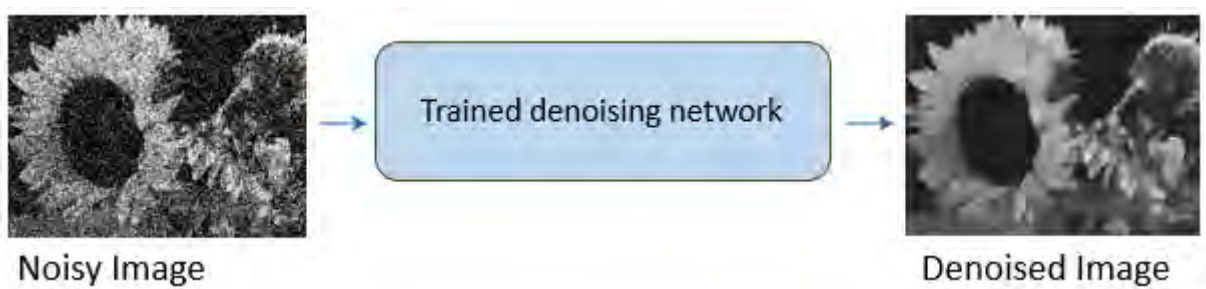


Рис. 23 Застосування методів поглибленого навчання

Також варто розглянути Python, завдяки багатьом бібліотекам, використовуючи їх можна працювати з масивами даних, наприклад, можна використати numpy, pandas. Для роботи з зображеннями можна використати opencv. Також корисним може бути pytorch для машинного навчання. Перевагою даної мови програмування є те, що вона вважається однією з найлегших для вивчення і одночасно має широкий спектр можливостей [27].

Деякі функції в Python схожі на ті які в Matlab, наприклад, визначення країв зображення наприклад, cv2.Canny() (Рис. 24) [28].



Рис. 24 Визначення країв за допомогою Python

Було перераховані універсальні засоби, але також існують спеціалізовані програми як наприклад ENVI (Environment for Visualizing Images).

ENVI (Environment for Visualizing Images) - програмне забезпечення для зображень.

Основні можливості:

1. обчислення вегетаційних індексів (NDVI, SAVI, EVI, GNDVI тощо);
2. екстракція біофізичних параметрів (вміст хлорофілу, вологості, площі листя);
3. ENVI підтримує широкий спектр форматів даних з супутників Sentinel, Landsat, MODIS, що робить його корисним для моніторингу великих площ посівів.

Якщо порівнювати вище наведені різні варіанти, найбільш універсальними можна назвати Matlab та python, особливо якщо порівняти з спеціалізованими програмами, інформації про користування якими набагато менше порівняно з Matlab, але варто обирати засоби в залежності від поставлених задач. Також порівнюючи Matlab та Python, Python потребує більше часу на ознайомлення, Matlab має більш інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та більш структуровану інформацію.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі проведено комплексний аналіз сучасних систем контролю росту рослин, узагальнено їхні основні компоненти та функціональні можливості. На прикладах реальних рішень розглянуто принципи їхньої роботи, сфери застосування та фізичні властивості, на яких базуються дані технології.

Розглянуто різні методи діагностики стану рослин, здійснено їх класифікацію та порівняння, визначено ключові плюси та мінуси кожного підходу. Особливу увагу приділено вегетаційним індексам: наведено їхні формули, описано, які параметри рослинності вони відображають та яку роль відіграють у комплексній оцінці стану культур.

Окремо досліджено спектральні сенсори, розкрито відмінності між їх видами, а також проведено порівняння з точки зору вартості та можливостей застосування у практичних умовах. Додатково виконано аналіз програмних засобів, визначено, які з них найкраще підходять для поставлених завдань, окреслено їхні переваги та функціональні особливості. Також розглянуто спеціалізоване комерційне програмне забезпечення, його основні можливості, а також інструменти для обробки отриманих даних і їх візуалізації з метою подальшого аналітичного опрацювання.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ РОЗРОБЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Вибір камери для проведення дослідження

Для поставленої задачі необхідно отримати зображення з камери яка працює у видимому діапазоні довжин хвиль та ближньому ІЧ. Відповідно до таких параметрів можуть підійти: гіперспектральні камери, мультиспектральні або розділити на дві камери, одна з них працює лише в RGB діапазоні, інша в ближньому ІЧ. Видимий спектр складає 380-750нм, ближній ІЧ 780-3000нм [29].

Звісно ідеальним варіантом було б використати гіперспектральну камеру: робота в багатьох спектрах, точні результати, проте основним недоліком є її ціна, яка може сягати більше сотні тисяч гривень. Наприклад, iRb10UVN36KM-2 Line Scan 400-1000nm VIS-NIR Hyperspectral Camera коштує 654813,53 грн, для поставленої цілі це не є невиправданою ціною, тим більше використовуючи інші методи, ціна буде значно меншою, а результати залишаться достатньо точні.

Мультиспектральні:

DJI Mavic 3M Multispectral RGB-камеру з мультиспектральною камерою. Мультиспектральна камера працює з ближнім ІЧ, червоним, зеленим та червоним edge, під нею розташовується RGB камера, може літати протягом 43 хвилин, ціна орієнтовно 172179 грн.

Parrot Sequoia є однією з найбільш класичних камер для сільського господарства, має 4 спектральних канали, спектральний діапазон 550-810 нм. По розташуванню камер схоже на Mavic, RGB камера знаходиться внизу, ближнім ІЧ, червоним, зеленим та червоним edge над нею. Може

бути встановлена на дрон, може використовуватися окремо, внутрішньої пам'яті 64ГБ. Ціна 126720 грн (Рис. 25).



Рис. 25 Складові Parrot Sequoia

5MP 60fps CMOS Global Shutter USB3.0 RGB NIR Camera For Inspection, дана камера має RGB+NIR, схожі параметри на попередні приклади, але не має red edge, але її відсутність на результати не вплине, її перевагою є доступніша ціна 58500 грн (Рис. 26).

Logitech C922 Pro Stream USB Webcam має лише RGB канали, це USB камера, зазвичай використовується більше як камера для zoom meetings, але її можна застосувати і для зйомки рослин, просто щоб зробити необхідні знімки, потрібно буде підключити її до ноутбуку. Можна пошукати інші варіанти більш зручні для налаштування але по ціні вони вийдуть дорожче, ціна цієї камери 3399 грн.



Рис. 26 RGB камера

NIR камера

Basler ace acA1300-60gmNIR ціна 26000 грн, хоч точного діапазону не вказано, але камера зазначена в специфікації як NIR, тому проблем не має бути.

Як видно з порівнянь дешевше буде встановити по окремої RGB камеру та NIR камеру, але головний нюанс це те що зображення не будуть зроблені з одного кута, і пікселі не будуть співпадати, тоді доведеться додатково реєструвати зображення, вирівнювати [30].

2.2 Блок-схема алгоритму

Детальніше про блок-схему: першим кроком необхідну інформацію підвантажувати для подальшої обробки, файл у випадку якщо зроблено

на мультиспектральну камеру, яка видає один файл що містить потрібну інформацію, або декілька зображень, наприклад, якщо було використано окремо RGB та NIR камери [31].

Наступний крок є обробка зображення, навіть для мультиспектральних камер можуть бути шуми які вплинуть на точність результату, для декількох зображень можливо що фото було зроблені під певною похибкою куту через те що камери фізично не могли розташовуватися в одному місці, наприклад NIR, RGB тоді потрібно реєструвати пікселі. Також можливий варіант що потрібно буде обрізати зображення з метою позбутися непотрібних ділянок які теж можуть згодом під час обробки вплинути на результати.

Оскільки для оцінки стану рослин потрібно визначити індекси вегетативності, для їх розрахунку потрібно знати значення окремо з кожного каналу, для NDVI наприклад потрібно окремо RED [32].

Важливою частиною для подальшого аналізу є візуалізація на фото індексів, тоді можна буде легко сказати в якій частині знаходиться більш здорова рослинність, а де проблемна ділянка, можуть проявити приховані деталі щодо стану рослини, на вигляд вона може здаватися здоровою, але вже почався стрес.

Також корисним є виділити зону лише рослинності, для візуалізації, але це чудово працює за допомогою порівняння з певним значенням NDVI. Наприклад, поставити граничний коефіцієнт і все що більше нього буде вважатися рослинністю, певною мірою це дозволить переконатися в правильності коефіцієнту, та також про стан рослини, бо якщо він менше 0,3, то це або, наприклад, ґрунт, вода чи небо або ж рослина, яка знаходиться в жахливому стані.

Зображення складається з пікселів і кожен з них має в собі інформацію, по цьому можна побудувати гістограму яка буде

відображати яка кількість пікселів має певне значення NDVI, також можна поставити граничне значення щодо якого порівнювати, можна визначити чи є засвічення на зображенні якщо значення буде 1, скільки рослинності чи вона переважає [33].

Зображення може бути зроблене на дрон або людиною так що буде не лише на всьому зображенні присутні рослини з грядки, наприклад, але може бути зроблено збоку і частинка неба або будівель на фермерському господарстві буде видно або ж може цікавити саме певний регіон зображення, подивитися детальніше та більш сконцентруватися на якихось окремих рослинах, а маючи повне зображення отримати з бажаної ділянки інформацію про середні значення наприклад NDVI буде неможливо, і якщо будуть обчислення всього зображення то може відбуватися спотворення правдивості результатів. Тому варто додати функціонал за допомогою користувач міг би виділити бажану ділянку на зображенні та отримати з неї подальшу інформацію.

Можна створити таблицю яка показувала результати по різних індексах, середнє значення з загального фото та якщо користувачу потрібно було то і з певної ділянки, загально дасть уявлення про стан рослин.

Для полегшення розшифровування отриманих результатів, варто створити таблицю, де буде описано що значить ті чи інші значення, тобто який стан рослинності відповідно до них та які заходи варто вжити якщо допустимо наприклад відповідно до індексу NDVI рослина має стрес.

За таким планом можна створити блок-схему алгоритму (Рис. 27).

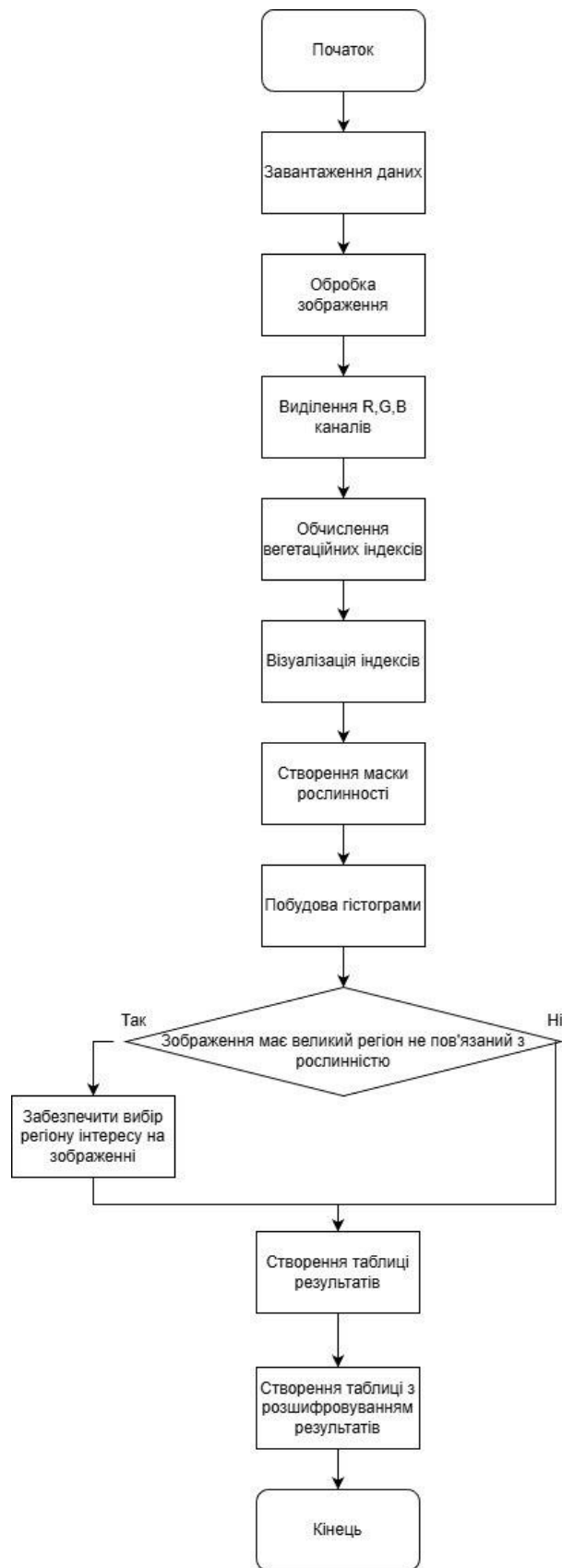


Рис. 27 Блок-схема алгоритму

2.3 Інтерпретація індексів

В теоретичній частині було детально описано декілька індексів, проте для повного розуміння зібрано коротку та найбільш структуровану інформацію про кожен використаний індекс та подано таблицю з описом розрахунку кожного з них.

NDVI найпоширеніший індекс, допомагає слідкувати за динамікою розвитку рослин, з мінусів чутливий до кількості ґрунту, чутливий до атмосферних змін як туман, дим. З плюсів, застосовувати можна протягом всього сезону.

GNDVI схожий на NDVI, але є його модифікацією. В ньому замість видимого червоного використовують видимий зелений, що порівняно з NDVI робить його більш чутливим до хлорофілу.

SAVI використовується для мінімізації впливу ґрунту він присутній в великій кількості, наприклад на ранніх стадіях розвитку рослин. В ньому додано коефіцієнт L_d корекції для ґрунту. Даний коефіцієнт варіюється від -1 до +1, на що впливає кількість зеленого покриття, якщо точніше, то якщо в області густа та зелена рослинність то коефіцієнт буде дорівнювати 0, тоді SAVI буде абсолютно дорівнювати значенню NDVI, по формулі в цьому можна переконатися якщо підставити замість L_d 1.

EVI був створений щоб коригувати атмосферні шуми, що є проблемою для NDVI, чудово підходить для тропічних лісів, де висока вологість. Більш чутливий на відміну від NDVI до зон з густою рослинністю. Був створений для сенсора NASA MODIS, він використовує такі значення індексів: $C_1=6$, $C_2=7,5$ і $L=1$.

VARI його беззаперечним плюсом є те що не потрібно NIR зображення, він працює з RGB, проте це є і плюсом так і мінусом, оскільки показує лише візуальну зеленість, і чутливий до тіней або

навпаки надто яскравого сонця, але має низьку чутливість до атмосферних впливів [34].

Також для зручності та наочності подамо таблицю з описом значень кожного індексу.

Таблиця 2 Опис значень вегетаційних індексів

Показник	Значення	Характеристика
NDVI	< 0,15	найімовірніше, всі рослини в цій частині поля загинули
	0,15 - 0,2	рослинність тільки починає з'являтися (слабка або дуже рання рослинність)
	0,2 - 0,3	початок активного росту
	0,3 - 0,5	середня біомаса
	0,5+	добре розвинена зелена маса
GNDVI	< 0	рослинність відсутня
	0,0 – 0,1	голий ґрунт, сухі залишки, жива рослинність відсутня
	0,1 – 0,2	слабке зелене покриття, проростання
	0,2 – 0,5	здорова вегетація
	0,5 – 0,9	щільна, здорова вегетація
EVI	< 0	вода, хмари, технічні шумові ділянки
	0-0,1	голий ґрунт, дуже слабка рослинність
	0,1-0,2	розріджені посіви
	0,2-0,4	середня біомаса, активний ріст
	0,4-0,6	здорова, інтенсивна рослинність
	> 0,6	дуже густа зелена біомаса або ліс
SAVI	< 0	вода, асфальт
	0-0,1	голий ґрунт
	0,1-0,2	слабка рослинність
	0,2-0,4	помірна рослинність
	0,4-0,6	гарне покриття рослинністю
	> 0,6	висока біомаса

Висновки до розділу 2

В другому розділі було розглянуто камери, які дозволяють зробити необхідні зображення та для коректної їх обробки з метою отримання релевантних значень, було проведено порівняння та аналіз кожного виду за різними параметрами, було рекомендовано до використання, або мультиспектральну камеру, або поєднання RGB камери та NIR камери.

Також було створено алгоритм роботи майбутньої програми за яким можна отримати уявлення про програму та необхідні блоки функції, які в ній мають бути присутні. Чітко сформований алгоритм значно полегшує подальший процес розробки програми, запобігаючи повторенням, допомагаючи йти крок за кроком реалізації.

Не менш важливим етапом було узагальнення інформації про кожен індекс, дана інформація дає уявлення про те, за що кожен з них відповідає та які його значення про що свідчить. Цю інформацію можна буде потім інтегрувати в функціонал програми.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Обробка та підготовка вхідного зображення

Для втілення в життя такої обробки зображень, найбільш підходящим варіантом є Матлаб. Робочий код:

```
clear; close all; clc;

% 1. ЗАВАНТАЖЕННЯ ТА ПІДГОТОВКА ЗОБРАЖЕННЯ

%Завантаження зображень та перетворення пікселів у 0-1, для
коректності

%обрахування індексів
img = imread("C:\Users\Anna\Downloads\nirscene0\nirscene0\jpg1\country_0020.jpg");

img = im2double(img);

%Розділення на RGB та NIR
w = size(img, 2); %Знаходження ширини(2 свідчить про розрахунок
стовпців)

rgb = img(:, 1:floor(w/2), :); % : - всі рядки, 1:floor(w/2) - стовпці до
середини, : - всі канали

nir_rgb = img(:, floor(w/2)+1:end, :); % так само як і в попередньому
рядку, але беремо праву частину

nir = nir_rgb(:, :, 1); % витягуємо NIR

% Обрізання порожніх зон навколо зображення
gray_rgb = rgb2gray(rgb); %перетворення на одно каналне
зображення щоб потім визначити де корисна частина без чорних полів

mask_valid = gray_rgb > 0.02; % знаходження чорних полів
```

```

    props = regionprops(mask_valid, 'BoundingBox'); %визначаємо
прямокутником де знаходиться інформація самого зображення, а де чорна
частина
    if ~isempty(props)
        bbox = props(1).BoundingBox; %створення прямокутника навколо
реальної частини зображення
        rgb = imcrop(rgb, bbox);%вибір реальної частини зображення за
прямокутником та відрізання чорного регіону
        nir = imcrop(nir, bbox);%відокремлення такого самого регіону з
NIR зображення
    end
    figure;
    subplot(1,2,1); imshow(rgb); title('RGB');
    subplot(1,2,2); imshow(nir, []); title('NIR');
% 2. Розділення на RGB КАНАЛИ
    red = rgb(:,:,1);
    green = rgb(:,:,2);
    blue = rgb(:,:,3);

```

3.2 Блок роботи з індексами

```

% 3. Розрахунок вегетаційних індексів
eps_val = 1e-6; %вводиться змінна щоб уникнути ділення на 0
NDVI = (nir - red) ./ (nir + red + eps_val);
GNDVI = (nir - green) ./ (nir + green + eps_val);

```

$L = 0.5$; %Коефіцієнт прирівнюється до 0,5 за рекомендаціями оскільки таке значення найбільше підходить для всіх видів покриття ґрунту

$SAVI = ((nir - red) ./ (nir + red + L + eps_val)) * (1 + L);$

$EVI = 2.5 * (nir - red) ./ (nir + 6*red - 7.5*blue + 1 + eps_val);$

$VARI = (green - red) ./ (green + red - blue + eps_val);$

% Обмеження індексів в -1;1 - фізичних правильних діапазонах, бо може бути

% менше -1 через шуми камери наприклад

$NDVI = \max(\min(NDVI, 1), -1);$

$GNDVI = \max(\min(GNDVI, 1), -1);$

$SAVI = \max(\min(SAVI, 1), -1);$

$EVI = \max(\min(EVI, 1), -1);$

$VARI = \max(\min(VARI, 1), -1);$

% 4. Візуалізація індексів

`figure('Name','Vegetation Indices'); colormap(jet);`

`subplot(2,3,1); imagesc(NDVI); axis image; colorbar; caxis([-1 1]); title('NDVI');`

`subplot(2,3,2); imagesc(GNDVI); axis image; colorbar; caxis([-1 1]); title('GNDVI');`

`subplot(2,3,3); imagesc(SAVI); axis image; colorbar; caxis([-1 1]); title('SAVI');`

`subplot(2,3,4); imagesc(EVI); axis image; colorbar; caxis([-1 1]); title('EVI');`

`subplot(2,3,5); imagesc(VARI); axis image; colorbar; caxis([-1 1]); title('VARI');`

3.3 Блок графічної візуалізації

```
% 5. Створення маски рослинності за значенням NDVI
threshold = 0.3; %те що вище цього значення буде вважатися
рослиною
veg_mask = NDVI > threshold; %логічна матриця яка заповнюється
значеннями ті які вважаються рослиною і ні
figure;
subplot(1,3,1); imshow(rgb); title('Original RGB (cropped)');
subplot(1,3,2); imshow(veg_mask); title('Vegetation Mask (NDVI >
0.3)');
subplot(1,3,3); imshow(rgb); hold on;
%Створення прозорого зеленого зображення яке буде накладатися на
%оригінальне
overlay = imshow(cat(3, zeros(size(veg_mask)), ones(size(veg_mask)),
zeros(size(veg_mask))));
set(overlay, 'AlphaData', 0.3 * veg_mask);
title('Vegetation Overlay');
% 6. Гістограма NDVI
figure;
histogram(NDVI(:), 50, 'FaceColor','g'); hold on; %:-перетворення
матриці на вектор, "g"-колір стовпців
yl = ylim;%межі графіка
plot([threshold threshold], yl, 'r--', 'LineWidth', 2);
xlabel('NDVI value'); ylabel('Number of pixels');
title('NDVI Histogram with Threshold');
legend('NDVI values','Threshold');
% 7. Середні значення зображення
```

```

mean_NDVI = round(mean(NDVI(:),'omitnan'),3);
mean_GNDVI = round(mean(GNDVI(:),'omitnan'),3);
mean_SAVI = round(mean(SAVI(:),'omitnan'),3);
mean_EVI = round(mean(EVI(:),'omitnan'),3);
mean_VARI = round(mean(VARI(:),'omitnan'),3);
% 7B. Функція вибору регіону інтересу користувачем
figure; imshow(rgb);
title('Виділіть область полігоном і двічі натисніть лівою кнопкою');
roi_mask = roipoly;
if isempty(roi_mask) %нічого не вибрали то повертається значення
Nan
    mean_NDVI_roi = NaN; mean_GNDVI_roi = NaN;
    mean_SAVI_roi = NaN; mean_EVI_roi = NaN; mean_VARI_roi =
Nan;
else
    colored_roi = rgb;
    colored_roi(repmat(~roi_mask,1,1,3)) = 0;
    figure; imshow(colored_roi);
    title('Обрана область (ROI)');
    mean_NDVI_roi = round(mean(NDVI(roi_mask),'omitnan'),3);
    mean_GNDVI_roi = round(mean(GNDVI(roi_mask),'omitnan'),3);
    mean_SAVI_roi = round(mean(SAVI(roi_mask),'omitnan'),3);
    mean_EVI_roi = round(mean(EVI(roi_mask),'omitnan'),3);
    mean_VARI_roi = round(mean(VARI(roi_mask),'omitnan'),3);
end

```

3.4 Блок табличної візуалізації

% 10. Таблиця інтерпретацій

IndexName = {'NDVI';'GNDVI';'SAVI';'EVI';'VARI'};

ValueRanges = {

'<0 | 0–0.1 | 0.1–0.3 | 0.3–0.6 | >0.6';

'<0.2 | 0.2–0.5 | >0.5';

'<0.2 | 0.2–0.5 | >0.5';

'<0.1 | 0.1–0.3 | >0.3';

'<0 | 0–0.1 | 0.1–0.2 | >0.2'

};

Interpretation = {

'відсутність живих рослин–густа рослинність';

'жива рослинність відсутня–щільна вегетація';

'асфальт, вода, нежива природа–висока біомаса';

'вода, хмари, нежива природа–дуже густа біомаса';

'Зеленість слабка–висока';

};

UseCases = {

'Моніторинг здоров'я';

'Оцінка хлорофілу';

'Компенсація ґрунту';

'Густа рослинність';

'RGB-аналітика';

};

Recommendations = {

'Полив / азот';

'Азотні добрива';

```

    'Підвищити вологість';
    'Перевірити хвороби';
    'Мікроелементи';
};

T = table(IndexName, ValueRanges, Interpretation, UseCases,
Recommendations);

figure('Name','Vegetation Indices Interpretation','Color','w');
uitable('Data', T{:, :}, ...
    'ColumnName', T.Properties.VariableNames, ...
    'FontSize', 10, 'Units','Normalized','Position',[0 0 1 1]);

% 11. Таблиця індексів та розшифровка
IndexNames2 = {'NDVI'; 'GNDVI'; 'SAVI'; 'EVI'; 'VARI'};
Formulas = {
    '(NIR - Red) / (NIR + Red)';
    '(NIR - Green) / (NIR + Green)';
    '((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) * (1 + L)';
    '2.5 * (NIR - Red) / (NIR + 6*Red - 7.5*Blue + 1)';
    '(Green - Red) / (Green + Red - Blue)';
};
Descriptions = {
    'Загальний стан рослин';
    'Акцент на кількість хлорофілу';
    'Коригування впливу ґрунту';
    'Коригування впливу атмосфери';
    'Оцінка лише у видимому спектрі, має низьку чутливість до
атмосферних змін'
};

T_formula = table(IndexNames2, Formulas, Descriptions);

```

```

figure('Name','Формули вегетаційних індексів','Color','w');
uitable('Data', T_formula{:,:}, ...
    'ColumnName', T_formula.Properties.VariableNames, ...
    'FontSize', 12, 'Units','Normalized','Position',[0 0 1 1]);
% 12. Таблиця по індексах для всього зображення та регіону інтересу
figure('Name','Кольорова аналітична таблиця','Color','w');
ax = axes('Position',[0 0 1 1]); axis off;
indices = {'NDVI','GNDVI','SAVI','EVI','VARI'};
values_img = [mean_NDVI; mean_GNDVI; mean_SAVI; mean_EVI;
mean_VARI];
values_roi = [mean_NDVI_roi; mean_GNDVI_roi; mean_SAVI_roi;
mean_EVI_roi; mean_VARI_roi];
row_h = 0.12;
y = 0.85;
for i = 1:5
    idx = indices{i};
    [txt_roi, clr] = interpret_value(idx, values_roi(i));
    switch clr
        case 'green', bg = [0.75 1.0 0.75];
        case 'gold', bg = [1.0 0.95 0.6];
        case 'orange', bg = [1.0 0.8 0.5];
        case 'red', bg = [1.0 0.6 0.6];
        otherwise, bg = [0.9 0.9 0.9];
    end
    rectangle('Position',[0.05 y-0.08 0.9 row_h], ...
        'FaceColor', bg, 'EdgeColor','k', 'LineWidth',1);
    text(0.08, y, idx, 'FontSize',14,'FontWeight','bold');
    text(0.25, y, sprintf('%.3f', values_img(i)), 'FontSize',13);

```

```

text(0.4, y, sprintf('%0.3f', values_roi(i)), 'FontSize',13);
text(0.55, y, txt_roi, 'FontSize',12);
y = y - 0.15;
end
text(0.08, 0.93, 'Index','FontSize',14,'FontWeight','bold');
text(0.25, 0.93, 'Avg (Image)','FontSize',14,'FontWeight','bold');
text(0.4, 0.93, 'Avg (ROI)','FontSize',14,'FontWeight','bold');
text(0.55, 0.93, 'Interpretation','FontSize',14,'FontWeight','bold');
% ЛОКАЛЬНА ФУНКЦІЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ
function [text, color] = interpret_value(indexName, val)
    if isnan(val)
        text = 'Немає даних';
        color = 'gray';
        return;
    end
    switch indexName
        case 'NDVI'
            if val > 0.6, text='Густа, здорова рослинність'; color='green';
            elseif val > 0.3, text='Середня щільність'; color='gold';
            elseif val > 0.1, text='Стрес або рідкі посіви'; color='orange';
            else, text='нежива природа'; color='red'; end
        case 'GNDVI'
            if val > 0.5, text='Високий хлорофіл'; color='green';
            elseif val > 0.2, text='Нормальний рівень'; color='gold';
            else, text='нежива природа'; color='red'; end
        case 'SAVI'
            if val > 0.5, text='Гарний покрив'; color='green';
            elseif val > 0.2, text='Середній покрив'; color='gold';

```

```

else, text='нежива природа'; color='red'; end
case 'EVI'
if val > 0.3, text='Густа біомаса'; color='green';
elseif val > 0.1, text='Стрес'; color='gold';
else, text='нежива природа'; color='red'; end
case 'VARI'
if val > 0.2, text='Висока зеленість'; color='green';
elseif val > 0.1, text='Середня зеленість'; color='gold';
else, text='Слабка зеленість'; color='red'; end
end
end

```

3.5 Тестування програмного забезпечення та аналіз результатів

Вхідними даними є зображення зроблені за допомогою Nikon D90 та Canon T1i cameras, використовуючи B+W 486 (visible) and 093 (NIR) фільтри. Першим зображенням для аналізу є виноградник, програма спочатку розділила зображення на RGB та NIR, щоб було уявлення про вхідну інформацію (Рис.28).

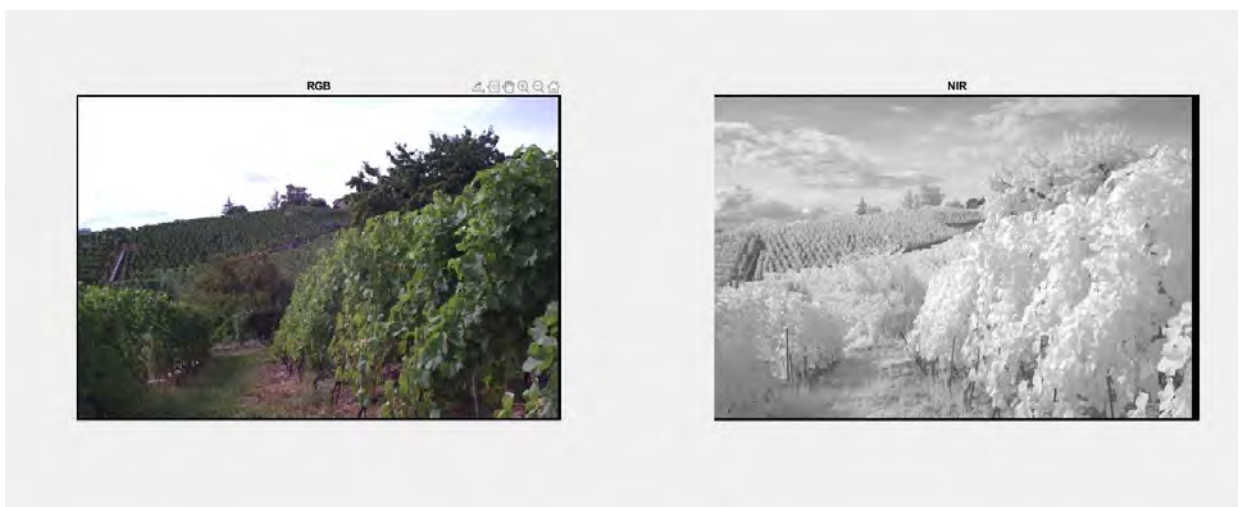


Рис. 28 Перше вхідне зображення

Далі розраховані значення вегетаційних індексів були візуалізовані за допомогою кольорових карт. (Рис 29 а). Для зручності їх інтерпретації, можна скористатися таблицею яка дає загальне уявлення про результати та за що вони відповідають, та рекомендації, які варто застосувати при незадовільних результатах (Рис. 29 б,в). Наприклад, якщо агроном який аналізує зображення своєї ділянки може не знати про деякі індекси і просто кольорові мапи для нього не будуть нести інформативності, маючи таблицю, яка пояснює що в такому діапазоні, знаходяться здорові рослини, а в іншому ті, які потребують додаткової уваги [35].

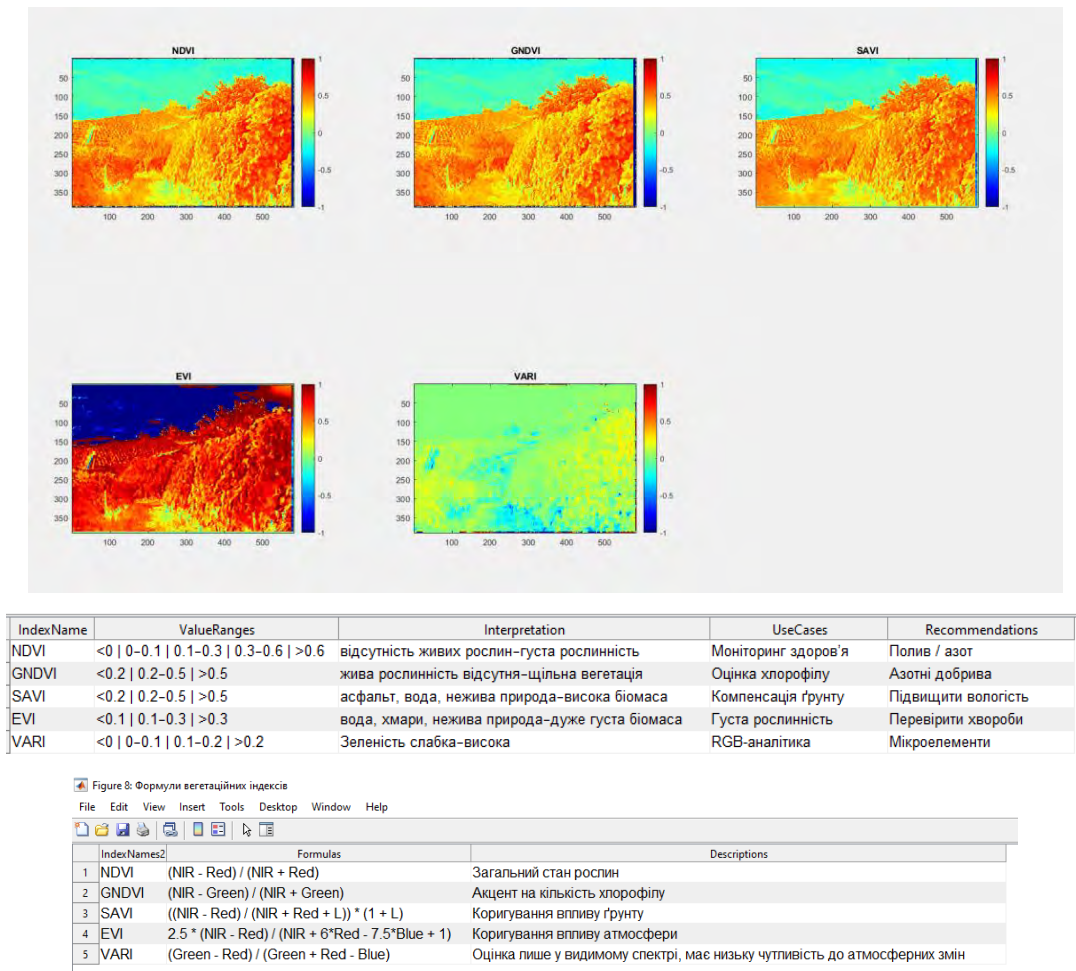


Рис. 29. а) Кольорова мапа візуалізації індексів б) Таблиця з інтерпретацією результатів в) Таблиця з загальною інформацією про індекси

Для зручності в програму було додано таблицю в якій коротко про кожен індекс та його формули.

Як можна бачити з NDVI карти, то загалом можна сказати що стан рослин задовільний, можна бачити регіон неба та землі, самі ж рослини мають значення більше 0.6, проте в деяких регіонах значення приблизно 0.3, за що відповідає жовтий колір, на даний момент це задовільний стан, проте якщо буде наприклад подальша посуха то стан може погіршитися, якщо дивитися на даний момент по картинці з точки людського зору, то видно що виноградник розташований в досить сонячній зоні, що може призводити до посухи, і це вимагає більшого поливу, відповідно до рекомендацій видно, що варто додати поливу [36].

GNDVI з першого погляду відрізняється від NDVI, він більш чутливий до хлорофілу, але менш чутливий до ґрунту, як видно то більший регіон де ґрунт було захоплено, але на ньому є певна рослинність, а так результат схожий на NDVI, що свідчить про хороший рівень хлорофілу та що фото було зроблено за умов які не дуже спотворювали це значення для NDVI.

SAVI результати можна сказати що ідентичні до NDVI, що є абсолютно логічним то очікуваним результатом, оскільки виноградник має густу рослинність та коефіцієнт відповідно дорівнював 0, завдяки цьому результати і вийшли ідентичні.

EVI результат має більшу різницю порівняно з попередніми результатами, отримано більш контрастну картину, проте не відображає справжньої картини. Через те що потрібно підбирати індекси і EVI створений під супутниковий сенсор, для камер вочевидь не підійшли його значення. Для аналізу краще не використовувати цей індекс

VARI результат не бере до уваги NIR канал, хоч здається що по результатам VARI мається не дуже зелені рослини, проте це зумовлено

тим, що на фото багато тіней, контраст невеликий саме цим спричинені такі результати, серед всіх індексів є найменш інформативним та найбільшим спотвореним саме VARI [37].

В наступному вікні видно вегетаційну маску створені за порогом $NDVI > 0.3$, відокремлено рослини точно. Функції спрацювали чудово та наглядно все видно (Рис. 30).

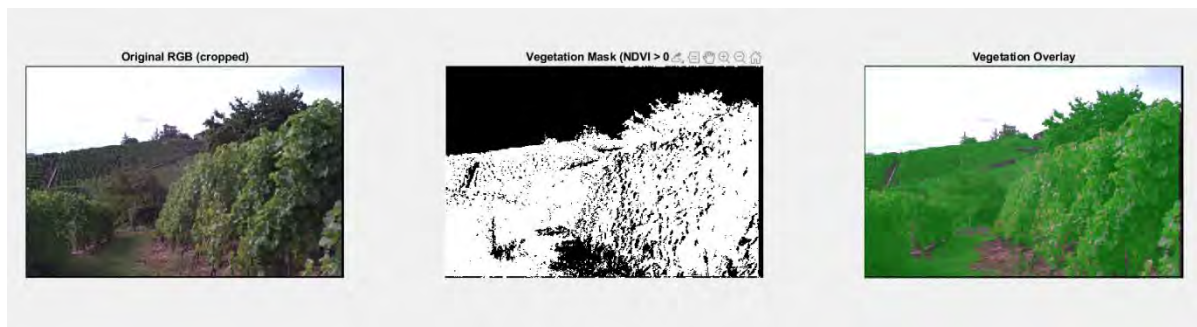


Рис. 30. Вегетаційна маска

Наступним результатом обробки є гістограма NDVI з граничним значенням 0.3 і вище, яке відноситься до здорових рослин. -1 це нежива рослинність, тіні, небо [38]. Як можна бачити по фото що не рослинність теж має велику площу на фото, і як можна бачити здорової рослинності все ж переважна більшість, що свідчить про здоровий виноградник (Рис. 31).

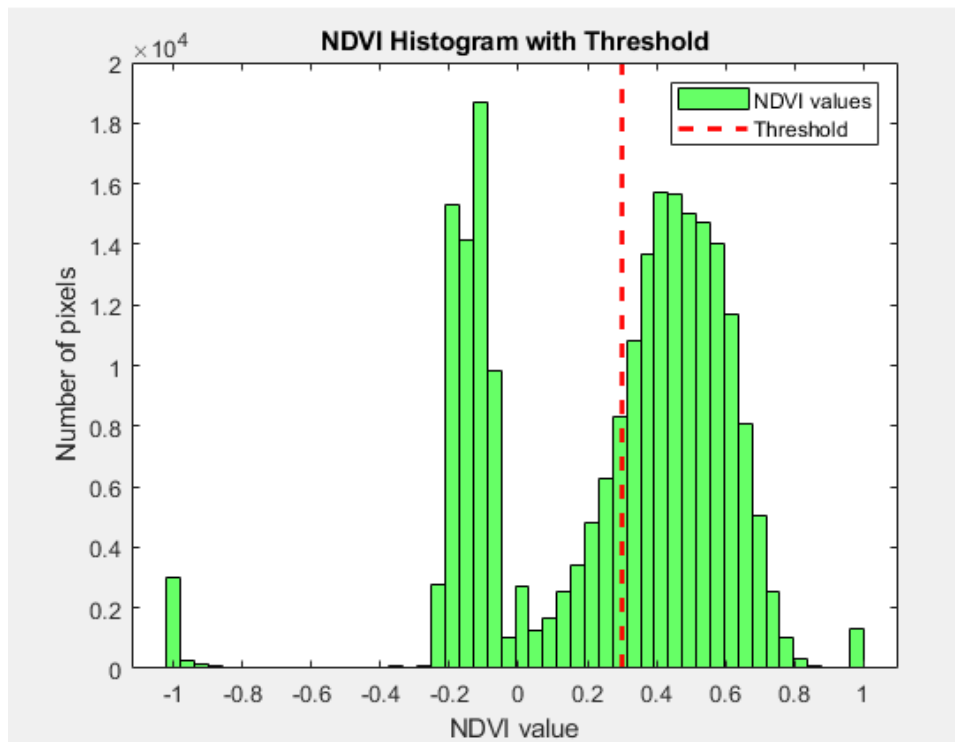


Рис. 31. Гістограма результатів

Далі бажаний регіон користувач може виділити та отримати результат по індексам лише по ньому (Рис. 32).

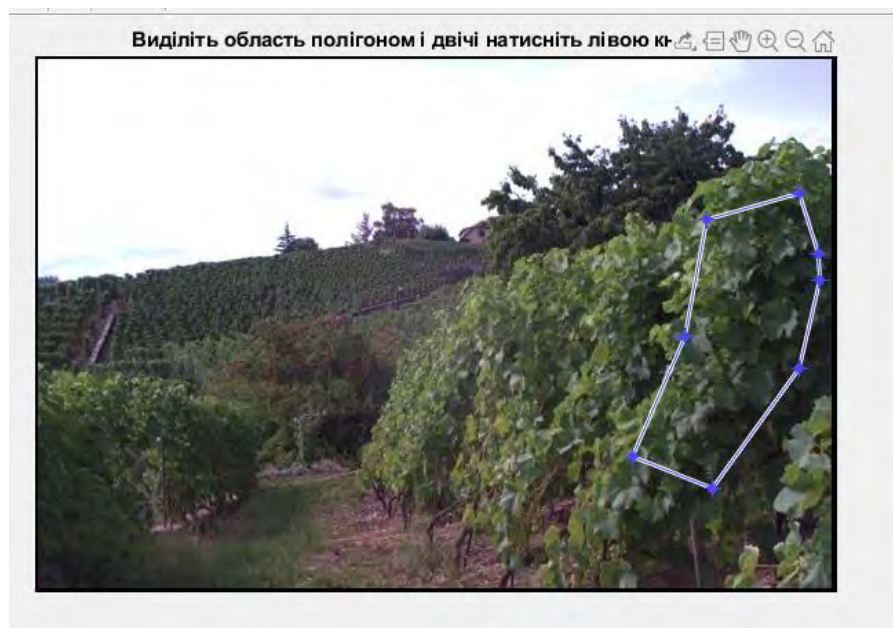
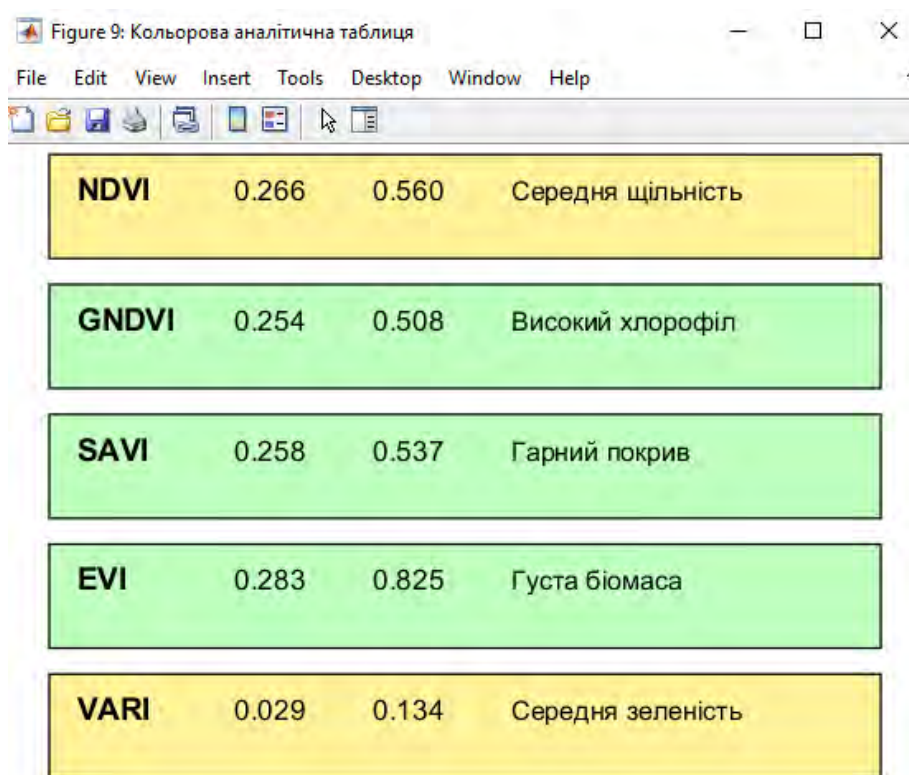


Рис. 32 Спосіб обрання регіону інтересу на зображенні

Після цього з'явиться таблиця де будуть наведені середні значення по всьому зображенню та виділеному регіону, де локалізовані рослини, можна бачити наскільки відрізняється результати, індекси для всього зображення нижчі через браття до уваги неба, землі, значення яких і понижували значення індексів, за цією таблицею можна сказати що рослини в чудовому стані, навіть VARI показує досить гарні результати незважаючи на похибку через контраст та тіні. За усіма отриманими результатами зроблено висновок про чудовий стан винограднику (Рис. 33).



Індекс	Всього зображення	Виділений регіон	Інтерпретація
NDVI	0.266	0.560	Середня щільність
GNDVI	0.254	0.508	Високий хлорофіл
SAVI	0.258	0.537	Гарний покрив
EVI	0.283	0.825	Густа біомаса
VARI	0.029	0.134	Середня зеленість

Рис. 33. Результати індексів з відповідною інтерпретацією

Для перевірки правильності роботи програми, виділено лише небо (Рис. 34).

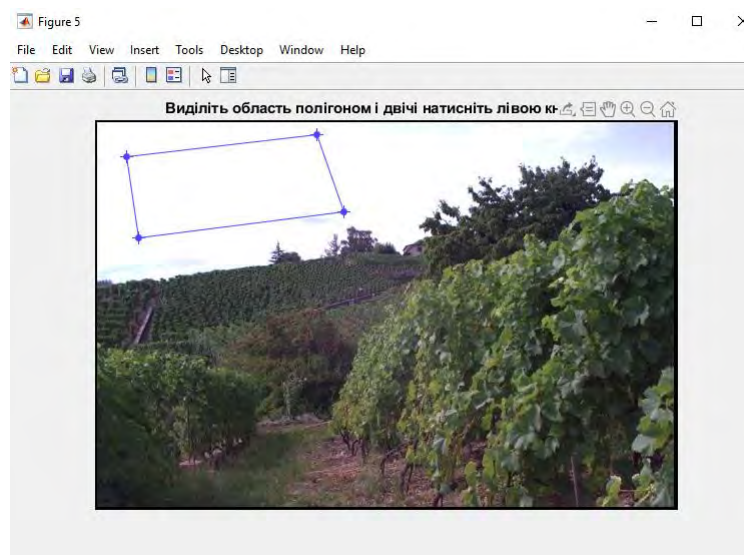


Рис. 34. Вибір регіоном інтересу неба

Очікуваний результат по всіх індексах, стан вибраного регіону свідчить що рослинність не присутня, відповідно індекси працюють коректно (Рис. 35).

Figure 9: Кольорова аналітична таблиця

NDVI	0.266	-0.124	нежива природа
GNDVI	0.254	-0.124	нежива природа
SAVI	0.258	-0.145	нежива природа
EVI	0.283	-0.984	нежива природа
VARI	0.029	0.000	Слабка зеленість

Рис. 35. Результати індексів при виборі неба

Для експерименту та отримання чи достовірно працює програма взято ще один приклад, в якого більше всього не настільки задовільний стан рослин може бути, густота має бути меншою насаджень (Рис. 36).



Рис. 36. Друге вхідне зображення

Відповідно як і в попередньому варіанті, отримано різні значення для індексів, за NDVI помітно що рослини ближче до стіни мають менш задовільний стан, результати NDVI, GNDVI, SAVI майже співпадають, SAVI більш точніше відображає ґрунтові регіони, EVI так само не відображає правильних значень, коефіцієнти не підходять, а за показаннями VARI можна бачити регіони рослинності, не настільки інформативно як за першими трьома, проте чітко можна відокремити від ґрунту, неба, як для використання лише RGB даних, то результат досить задовільний (Рис. 37).

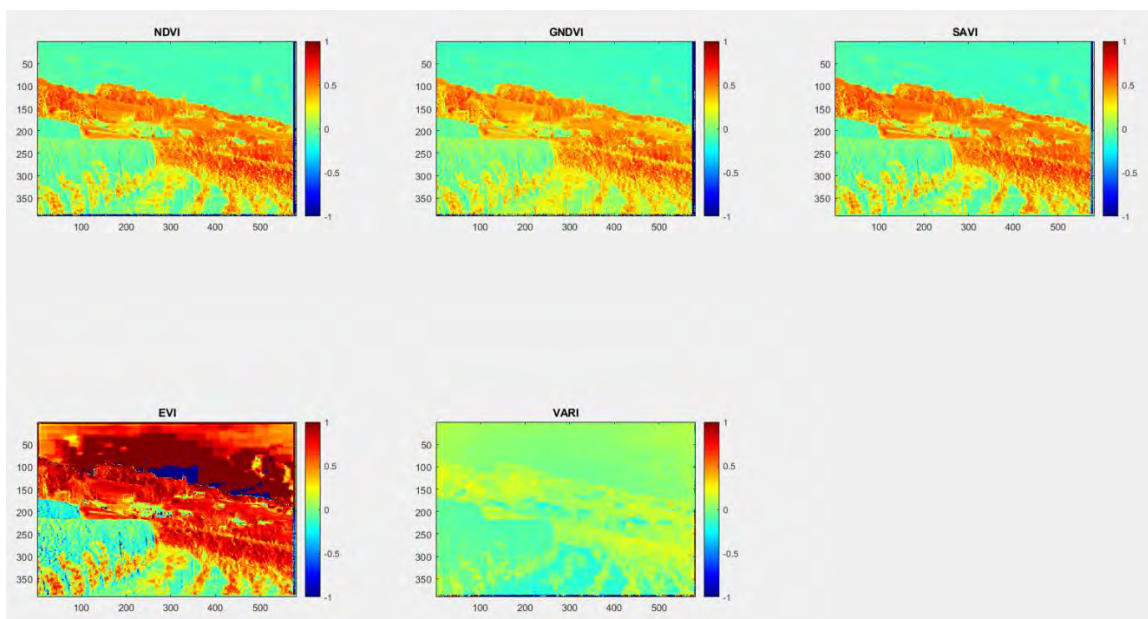


Рис. 37. Кольорові мапи індексів

Вегетаційна маска спрацювала чудово, на зображенні великий регіон займає стіна, ґрунт, будівлі, але вегетаційний індекс спрацював лише на рослини і навіть більше ту частину рослин яка має значення менше 0,3 маска не захопила (Рис. 38) [39].

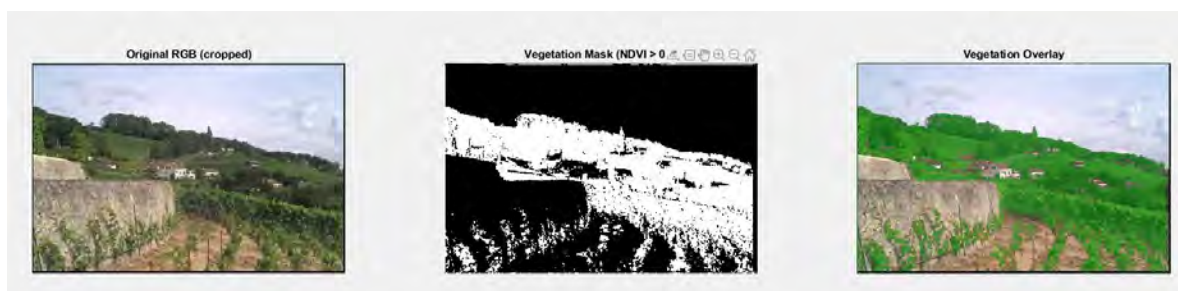


Рис. 38. Маска вегетації

Далі для вибору регіону інтересу можна вибрати стіну з рослин, де найбільш задовільні результати індексів (Рис. 39 а), міжрядкову рослинність з непоганими значеннями (Рис. 39 б), та рослини біля стіни, в яких найгірші показники (Рис. 39 в), відповідно до кольорових карт [40].

NDVI	0.134	0.606	Густа, здорова рослинність
GNDVI	0.126	0.547	Високий хлорофіл
SAVI	0.136	0.593	Гарний покрив
EVI	0.481	0.813	Густа біомаса
VARI	0.017	0.145	Середня зеленість

NDVI	0.134	0.455	Середня щільність
GNDVI	0.126	0.379	Нормальний рівень
SAVI	0.136	0.472	Середній покрив
EVI	0.481	0.573	Густа біомаса
VARI	0.017	0.130	Середня зеленість

NDVI	0.134	0.256	Стрес або рідкі посіви
GNDVI	0.126	0.234	Нормальний рівень
SAVI	0.136	0.270	Середній покрив
EVI	0.481	0.321	Густа біомаса
VARI	0.017	0.035	Слабка зеленість

Рис. 39. Таблиці інтерпретації результатів а) Для рослин з найкращими показниками б) Для рослин з непоганими показниками в) Для рослин зі стресом

Висновки до розділу 3

В даному розділі було розроблено програму за допомогою Matlab, яка має функціонал: обробки зображення, обрахунку вегетаційних індексів, візуалізації результатів різними способами, додатково в користувача є можливість аналізу обраної ним частини зображення.

Проведено аналіз отриманих результатів за двома зображеннями для отримання доказів коректності роботи даної програми. Було проведено експерименти для різних регіонів, порівняння результатів з кольорових карт, таблиці результатів, вегетаційної маски, результати за ними всіма зійшлися.

Для зручності користувача було візуалізовано результати за допомогою: гістограми, карт індексів, таблиці з поясненням та додаткових таблиць, за якими можна отримати рекомендації у випадку незадовільних результатів стану рослин.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «PlantScan»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

В даній таблиці описано загальну інформацію про проєкт, що спрямований на автоматизацію моніторингу стану рослин за вегетаційними індексами. Проведено аналіз проблематики, основних цілей та завдань стартапу, визначено ключові цільові групи та склад команди. Подана таблиця дозволяє структурувати зміст стартап-проєкту та виділити його стратегічні елементи.

Таблиця 3 Інформаційна карта стартап-проєкту

Назва блоку	Характеристика
Загальна характеристика стартап-проєкту	
Назва стартап-проєкту	PlantScan
Проблематика, яку вирішує стартап	Несвоєчасне виявлення стресів рослин, неефективне використання ресурсів. Традиційні методи контролю є трудомісткими та недостатньо інформативними.
Головні цілі та завдання проєкту	Підвищення ефективності агровиробництва; виявлення стресів рослин; формування рекомендацій щодо поливу, удобрення та захисту;
Головні цільові групи, на які спрямований проєкт	Сільськогосподарські підприємства, фермерські господарства, тепличні комплекси, агрономи-консультанти
Автори та команда стартап-проєкту	
Автори стартап-проєкту	Домашенко Анна
Опис продукту стартап-проєкту	
Назва та коротка характеристика продукту	PlantScan програмне забезпечення визначення незадовільного стану рослин за вегетаційними індексами
Сфера застосування та функціональне	Використовується для агромоніторингу, оцінювання росту рослин

призначення продукту	
Опис унікальних властивостей продукту стартапу	Автоматичний розрахунок індексів NDVI, GNDVI, EVI та ін.; наочні теплокарти;
Технічні характеристики	Програма створена в застосунку Matlab, працює з RGB та NIR зображеннями
Супровід продукту	Технічна підтримка користувачів, інструкції та навчальні матеріали, можливість підключення додаткових аналітичних модулів
Забезпечення стартап-проєкту	
Необхідні ресурси	Фінансові ресурси для розробки; камери
Потреба в інвестиціях	Інвестиції потрібні для закупівлі обладнання, інвестиції маркетингу
Інтелектуальна власність	Авторське право на програмне забезпечення; технічні алгоритми обробки індексів; база даних та моделі прогнозування;

Представлена таблиця дозволяє узагальнити ключову інформацію щодо концепції стартапу та визначити його стратегічні напрями. Аналіз показує, що проєкт орієнтований на вирішення важливих проблем аграрного сектору шляхом цифровізації та автоматизації моніторингу. Чітке окреслення цільових груп і завдань дає можливість сформулювати розуміння майбутніх користувачів та очікуваних результатів. Це створює основу для подальшого опису продукту.

Проаналізовано зміст запропонованої технологічної ідеї, напрями її застосування, користь для кінцевого користувача та ключові відмінності від вже існуючих рішень на ринку. Ідея передбачає створення автоматизованої системи моніторингу стану рослин, що ґрунтується на аналізі вегетаційних індексів (NDVI, GNDVI, SAVI тощо)

Таблиця 4 Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Автоматизована система оцінювання стану рослин на основі аналізу вегетаційних індексів	1. Сільськогосподарські підприємства	• Можливість швидкого виявлення стресів та відхилень у рості рослин • Оптимізація поливу, внесення добрив та засобів захисту
	3. Тепличні комплекси	• Підвищення врожайності та зниження витрат • Доступ до аналітики у зручному інтерфейсі

Представлений опис ідеї стартап-проєкту дає змогу комплексно оцінити його ключові компоненти, інноваційність та практичну значущість для аграрної галузі. Розробка спрямована на підвищення ефективності управління станом рослин за рахунок автоматизації аналізу вегетаційних індексів і використання різноманітних джерел спектральних даних. Представлено напрямки застосування та вигоди для користувача, що показує переваги розроблювальної системи.

Важливим етапом є порівняння спроможності продукту конкурувати з іншими схожими продукціями, якщо по всіх пунктах розроблювальни проєкт не має переваг, то немає сенсу шукати інвестиції наприклад, подальший розвиток проєкту буде складним.

Таблиця 5 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/	Техніко економічні ха	(потенційні) товари/концепції конку рентів	W (слаб	N (нейт	S (силь
---------	--------------------------	---	------------	------------	------------

n	рактис тики ідеї	Мій проє кт	Конку рент 1	Конку рент 2	Конку рент3	ка стор она)	ра льна стор она)	на стор она)
1.	Аналітика вегетаційних індексів	Набір індексів + автоматич ні кольорові карти , рекоменда ції	Базові NDVI- карти без рекомен дацій	Узагальн ені звіти без інтеракти ву	Тільки зображ ення			S
2.	Вартість користування	Гнучка підписка за гектар / місяць, пільги для малих фермерів	Середня ціна	Висока вартість проєктни х робіт	Висока стартов а ціна			S
3.	Необхідність додаткового обладнання	Необов'яз кова	Необов'яз кова	Необов'яз кова	Потріб ен власни й дрон і ПЗ		N	
4.	Масштабованість системи	можливість обслугову вати десятки тис. полів	Хмарна	Обмежен а людськи ми ресурсам и	Залежи ть від кількос ті дронів		N	
5.	Поріг входу для користувача	Інтуїтивн ий інтерфейс, навчальні матеріали, підтримка	Складні інтерфей си	Залежніс ть від консульт антів	Потріб ні навичк и пілотув ання			S
6.	Інвестиційні витрати на запуск проєкту	Висока (розробка ПЗ та інфрастру ктури)	Дуже високі	Низькі, але масштабу вання обмежене	Високі (дрони, ПЗ)			S

Проект має виражені сильні сторони в частині аналітики, локалізації, гнучкого ціноутворення й інтеграцій; відносно слабе місце – потреба у початкових інвестиціях у розробку та інфраструктуру.

Може існувати різні методи реалізації проекту, потрібно обрати той який найбільший легкий для реалізації, щоб існували технології для цієї реалізації, та щоб економічно можливо було до реалізації.

Таблиця 6 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність техно логій
1.	Автоматизований розрахунок вегетаційних індексів за фото	Мультиспектральні або дуо RGB i NIR камер	Технології існують, активно застосовуються	Доступні за умов закупівлі камер
2.	Інтеграція дронів знімків високої роздільності	Камери ближнього ІЧ діапазону; 2) ПЗ для ортомозаїки; 3) алгоритми калібрування	Існують готові рішення та SDK виробників	Доступні за умов закупівлі дрона та камер
3.	Хмарне зберігання даних та веб-доступ	Хмарні платформи (AWS/Azure/GCP або локальні аналоги); 2) веб-фреймворки (Django/Node.js); 3) бази даних (PostgreSQL, PostGIS)	Технології існують, масово застосовуються	Доступні, є безкоштовні або пільгові тарифи для стартапів
4.	Алгоритми класифікації стану рослин та формування рекомендацій	Методи машинного навчання / статистики; 2) бібліотеки ML (Scikit-learn, TensorFlow та ін.)	Існують, активно використовуються у дослідженнях	Потребують експертизи та навчальних даних, але технічно доступні
5.	Мобільний додаток для агронома	Android/iOS-розробка, крос-платформні фреймворки (Flutter, React Native)	Технології існують	Доступні для команди розробки
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Автоматизований розрахунок вегетаційних індексів за фото				

Технологічна реалізація можлива, основні технології є наявними й доступними, ключовий ризик – обсяг робіт із розробки ПЗ та накопичення навчальних даних. Обрано найбільш можливий та підходящий варіант серед розглянутих.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

У таблиці проаналізовано загальний стан ринку точного землеробства: кількість гравців, обсяги продажів, динаміку розвитку та основні обмеження для входу. Це дозволяє оцінити привабливість ринку та перспективи успішного впровадження продукту.

Таблиця 7 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ n/n	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	5–7 платформ від міжнародних та локальних постачальників
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Сотні млн грн на рік (оцінка з урахуванням витрат агрокомпаній на ІТ та точне землеробство)
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Потреба у стартових інвестиціях, компетенціях у GIS/ML, довга воронка продажів у агросекторі
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги до захисту персональних даних клієнтів, відповідність стандартам обробки просторової інформації
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15–25% для ІТ-сервісів у агросекторі (вище за банківський депозит)

Аналіз показав, що ринок перебуває у фазі активного зростання, а потреба в цифрових рішеннях для агросектору збільшується. Обмеження

для входу є помірними, що створює сприятливі умови для нового гравця. Ринок має високий потенціал для масштабування стартапу. Розвиток сільського господарства набирає обертів.

У таблиці проведено аналіз потенційних груп споживачів продукту, що дозволяє визначити ключові сегменти ринку та їх потреби. Для кожної групи проаналізовано специфіку поведінки клієнтів, їх очікування та вимоги до продукту й компанії. Такий аналіз дає змогу точніше сформувати маркетингову стратегію та адаптувати продукт під ринкові умови.

Таблиця 8 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ n/n	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Зменшення витрат на добрива, ЗЗР та паливо без втрати урожайності	Середні фермерські господарства (1–10 тис. га)	Немає окремого аналітичного відділу, рішення часто приймає власник або головний агроном; висока чутливість до ціни й швидкого результату.	До продукції: простий інтерфейс, зрозумілі карти індексів і готові рекомендації щодо диференційованого внесення ресурсів, мобільний доступ. До компанії: можливість тестового періоду, прозорі тарифи, оперативна підтримка.
2.	Централізований контроль стану посівів у різних регіонах	Великі агрохолдинги (>10 тис. га)	Є власні IT- та агрослужби, рішення ухвалюються колегіально, часто через тендери; вимагають інтеграції з існуючими ERP/CRM та	До продукції: масштабованість, підтримка великої кількості полів і користувачів, розширена аналітика, API та інтеграції, високий рівень інформаційної безпеки.

			системами моніторингу техніки.	До компаній: стабільність, досвід впровадження у великих господарствах, сервіс 24/7, персональний менеджер.
3.	Базове розуміння стану полів без складної аналітики	Малі фермерські господарства, фермерські кооперативи (<1 тис. га)	Часто низький рівень цифровізації, іноді нестабільний інтернет; рішення приймаються швидко, на основі власного досвіду, а не даних.	До продукції: мінімально необхідний набір функцій (карти індексів, сигнали про стрес), робота на смартфоні, можливість користуватися без довгого навчання, доступна ціна пакету. До компаній: прості пояснення без складних термінів, навчальні відео/демо, лояльна цінова політика (оплата за сезон / частинами).
4.	Зниження кредитних ризиків при фінансуванні агропроектів	Банки, фонди розвитку, інвестори в агросекторі	Орієнтуються на портфельний аналіз ризиків; потрібні зрозумілі й порівнянні показники по різних господарствах; важлива повторюваність і формалізація даних.	До продукції: агреговані показники стану посівів по господарству, дашборди для портфельного аналізу, доступ до історичних даних за кілька сезонів, експорт у стандартні формати. До компаній: надійність, прозора методологія, можливість укладання рамкових договорів і довгострокового співробітництва.

Проведений аналіз показав, що основними цільовими групами є середні та великі аграрні підприємства, а також страхові компанії та малі фермери. Кожен сегмент має свої унікальні потреби та очікування щодо

функціональності, сервісу та економічного ефекту. Отримані результати дозволяють сформувати диференційований підхід до просування продукту та визначити пріоритетні напрями розвитку. Такий підхід підвищує ефективність виходу на ринок та забезпечує кращу відповідність продукту потребам споживачів.

У таблиці наведено фактори, що становлять потенційні загрози для впровадження стартап-проекту на ринку. Аналіз цих факторів дає змогу оцінити можливі ризики, спрогнозувати вплив зовнішнього середовища та визначити напрями зменшення негативного впливу. Це є важливим етапом формування стратегії управління ризиками.

Таблиця 9 Фактори загроз

№ n/n	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Нестабільна економічна ситуація та війна	Фермери скорочують інвестиції в нові IT-рішення	Запуск пілотних проєктів з оплатою від результату (частка зекономлених ресурсів), гнучкі тарифи
2.	Консерватизм агропідприємств	Небажання змінювати звичні підходи, недовіра до «цифри»	Демонстраційні поля, кейси з реальними результатами, навчання агрономів
3.	Поява сильних міжнародних конкурентів	Можуть зайняти ринок завдяки бренду та ресурсам	Фокус на локальній експертизі, україномовній підтримці й адаптації до місцевих умов
4.	Обмеження доступу до супутникових / аерофото даних	Зміни політики доступу до даних, часті хмарність	Комбінація різних джерел даних, використання радарних знімків, кешування історії
5.	Кіберзагрози	Ризик витоку даних клієнтів	Впровадження політики інформаційної безпеки, шифрування, резервне копіювання

Аналіз загроз показав, що найбільш суттєвими є нестабільна економічна ситуація, конкуренція з боку міжнародних платформ та

обмеження доступу до вихідних даних. Також важливими є технологічні й безпекові ризики. Проте більшість загроз може бути мінімізована завдяки адаптації тарифної політики, демонстраційним проектам, локалізації сервісу та підвищенню захищеності даних. Це свідчить про реалістичність виходу стартапу на ринок за умови грамотного управління ризиками.

Таблиця містить перелік факторів, які створюють можливості для успішного ринкового впровадження стартап-проекту. Аналіз цих факторів дозволяє окреслити сприятливі тенденції та зовнішні умови, які можуть бути використані для прискорення розвитку бізнесу. Розуміння цих можливостей сприяє формуванню ефективної маркетингової стратегії.

Таблиця 10 Фактори можливостей

№ n/n	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання цін на добрива й ЗЗР	Фермери шукають способи економити ресурси	Акцент в комунікаціях на економію до X% за рахунок диференційованого внесення
2.	Діджиталізація агросектору	Поширення ERP, агро-CRM, автоматизація техніки	Пропозиція готових інтеграцій, API, модулів для популярних систем
3.	Державні та міжнародні програми еко-та смарт-землеробства	Співфінансування впровадження рішень	Участь у грантових програмах, партнерства з донорами
4.	Зростання попиту на прозорість у страхуванні й кредитуванні	Потрібні об'єктивні дані про стан полів	Спеціальні продукти «для страхових» та «для банків»
5.	Розвиток БПЛА та здешевлення дронів	Легший збір даних високої роздільності	Партнерства з сервісами дронowego обльоту, спільні пакети послуг

Результати аналізу свідчать, що проєкт має значні перспективи завдяки зростанню попиту на точне землеробство, розвитку діджиталізації та наявності державних і міжнародних програм підтримки. Можливості посилюються здешевленням дронів технологій та запитом на прозорість у страхуванні. Використання цих переваг дозволить стартапу сформувати конкурентну позицію та пришвидшити масштабування на ринку.

У таблиці проведено ступеневий аналіз конкурентного середовища ринку аграрних ІТ-рішень. Розглянуто типи конкуренції відповідно до вимог методики: за структурою ринку, рівнем боротьби, галузевою ознакою, видами товарів, характером конкурентних переваг та інтенсивністю конкуренції. Це дозволяє сформувати цілісне уявлення про конкурентний ландшафт ринку.

Таблиця 11 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентно спроможною)
Тип конкуренції: монополістична	На ринку присутні декілька міжнародних та локальних платформ моніторингу рослинності. Продукти пропонують схожий базовий функціонал (моніторинг за вегетаційними індексами), але відрізняються якістю аналітики, локалізацією, підтримкою та ціною.	Необхідно чітко формувати власні конкурентні переваги: локальні алгоритми, українська підтримка, рекомендації, висока точність індексів.
За рівнем конкурентної боротьби: національний із переходом до міжнародного	Основна конкуренція відбувається між компаніями, що працюють на ринку України; частина продуктів прийшла з міжнародного ринку. Конкуренти активно розвивають сервіси, запускають інтеграції та	Потрібно швидко оновлювати продукт, впроваджувати новий функціонал, брати участь у виставках, створювати

	партнерства	партнерські програми.
За галузевою ознакою: внутрішньогалузева конкуренція	Конкуренція між агроаналітичними ІТ-платформами; частково міжгалузева конкуренція з агроконсалтинговими службами та дронними сервісами, що також надають аналітику.	Можливість комбінувати конкуренцію з партнерством (інтеграції, спільні проєкти), фокус на унікальних алгоритмах та автоматизації.
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Усі продукти належать до одного виду — систем моніторингу стану рослин, але відрізняються рівнем деталізації, частотою оновлення, наявністю рекомендацій, мобільністю, точністю алгоритмів.	Необхідно поліпшувати UX/UI, добавляти розширені індекси, реалізовувати рекомендації, підвищувати швидкість обробки даних.
За характером конкурентних переваг: переважно нецінова конкуренція	Клієнти обирають не найдешче, а найбільш точне, просте та надійне рішення з підтримкою українською та аналітикою. Ціна важлива для малих фермерів, але не є ключовим фактором.	Акцент на якості аналітики, рекомендаціях, локалізації, сервісі; паралельно — гнучкі тарифні плани для різних сегментів.
За інтенсивністю: марочна конкуренція	Компанії активно розвивають бренди, ведуть маркетингові кампанії, публікують кейси, підсилюють свою впізнаваність.	Компанія повинна створювати імідж, інвестувати в бренд, формувати портфель успішних кейсів та власну експертність.

Аналіз показав, що ринок характеризується монополістичною конкуренцією із зростаючим рівнем інтенсивності. Основна конкуренція має внутрішньогалузевий характер і пов'язана з товарно-видовою боротьбою між подібними платформами. Переважають нецінові конкурентні переваги, такі як якість аналітики, простота інтерфейсу та підтримка. Це створює умови для входу нового гравця, який може запропонувати кращу локалізацію, точніші алгоритми та ефективний сервіс.

У таблиці виконано аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил М. Портера. Розглянуто вплив прямих конкурентів, потенційних нових учасників, постачальників, клієнтів та товарів-замінників. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити інтенсивність конкуренції та привабливість ринку.

Таблиця 12 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові а налізу	Прямі конкурент и в галузі	Потенційні конк уренти	Постачальники	Клієнти	Товари замінники
	3–5 платформ супутникового моніторингу, локальні софти для точного землеробства	ІТ-компанії, що працюють у суміжних галузях (ERP, GIS), стартапи на базі відкритих даних	Постачальники супутникових/дронових даних, хмарні провайдери	Аграрії, страхові, банки	Ручний агроконсалтинг, прості GPS-треки без аналітики
Висновки	Сильна конкуренція, але є ніші за локалізацією та сервісом	Вхід можливий, бар'єри – експертиза та інвестиції	Постачальники мають середню силу впливу (можлива зміна тарифів)	Великі клієнти мають високу переговорну силу	Замінники у вигляді ручного консалтингу можуть конкурувати в окремих сегментах

Аналіз виявив середній рівень конкурентного тиску з боку існуючих компаній та відносно високу силу покупців. Бар'єри входу на ринок є помірними, що означає потенційне зростання кількості конкурентів. Постачальники не мають критичного впливу, а загроза замінників залишається середньою. Ринок є перспективним, але вимагає від компанії розробки сильних конкурентних переваг: якості аналітики, сервісу та локалізації.

У таблиці визначено ключові фактори конкурентоспроможності продукту, які впливають на його позиції на ринку. Оцінювання здійснене на основі вимог цільових сегментів та специфіки ринку аграрних IT-рішень. Це дозволяє сформувати набір характеристик, які необхідно розвивати для забезпечення стійкої конкурентної переваги.

Таблиця 13 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1.	Точність та стабільність розрахунку вегетаційних індексів	Від точності індексів напряму залежить коректність рішень (де внести добрива, де обробити ЗЗР)
2.	Локалізація та агрономічна експертиза для умов України	Локальні кліматичні, ґрунтові та технологічні особливості впливають на інтерпретацію індексів
3.	Інтеграція з існуючими системами господарства	Великі господарства вже використовують ERP/CRM; дублювання введення даних знижує цінність
4.	Гнучка модель ціноутворення	Висока цінова чутливість фермерів, особливо під час криз
5.	Швидкість отримання результатів (оновлення карт)	Важлива реальна оперативність – наприклад, перед внесенням добрив або під час появи стресу
5.	Надійність та інформаційна безпека	Дані про поля та врожайність є комерційно чутливими, клієнти звертають увагу на безпеку

Аналіз показав, що найбільш значущими факторами конкурентоспроможності є точність аналітики, простота інтерфейсу, локалізація та можливість інтеграції з іншими системами. Економічні вигоди також відіграють ключову роль при виборі продукту. Сформований перелік факторів визначає пріоритетні напрями розвитку системи та створює основу для побудови ефективної ринкової стратегії.

Таблиця містить порівняльний аналіз сильних і слабких сторін стартапу відносно основних конкурентів. Проведення такої експертної оцінки дозволяє визначити конкурентну позицію проєкту та визначити, у яких напрямках продукт має найбільші переваги.

Таблиця 14 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «PlantScan»

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Точність та стабільність розрахунку вегетаційних індексів	18			+				
2.	Локалізація та агрономічна експертиза для умов України	17	+						
3.	Інтеграція з існуючими системами господарства	16		+					
4.	Гнучка модель ціноутворення	15					+		
5.	Швидкість отримання результатів (оновлення карт)	16				+			
6.	Надійність та інформаційна безпека	17					+		

Аналіз свідчить, що проєкт має істотні сильні сторони в частині локалізації, простоти використання та точності аналітики. Конкуренти переважають лише в окремих аспектах, що не є критичними. Отримані результати підтверджують можливість формування стабільної ринкової ніші для продукту та його подальшого вдосконалення.

У таблиці проведено SWOT-аналіз стартап-проєкту, що дозволяє оцінити внутрішні сильні та слабкі сторони, а також зовнішні можливості й загрози. Такий аналіз допомагає сформувати стратегію розвитку та визначити ключові напрями вдосконалення продукту.

Таблиця 15 SWOT- аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: Локалізована платформа з урахуванням українських агротехнологій. Комбінація супутникових, дронів та наземних даних. Інтеграції з обліковими системами господарств. Гнучка тарифна модель, пілотні проєкти.	Слабкі сторони: Обмежені початкові ресурси стартапу. Залежність від відкритих даних і погодних умов (хмарність). Необхідність часу для накопичення історичних даних та кейсів. Потреба у сильній команді розробників та агрономів.
Можливості:Зростання попиту на точне землеробство та автоматизацію. Підтримка з боку міжнародних донорів та державних програм. Партнерства з виробниками техніки, дронівими сервісами, страховими. Вихід на зовнішні ринки (країни зі схожим кліматом).	Загрози:Поява потужних міжнародних конкурентів. Економічна нестабільність, зниження платоспроможності фермерів. Посилення вимог до інформаційної безпеки. Можливі зміни у політиці доступу до супутникових даних.

Результати SWOT-аналізу показали, що сильні сторони проєкту — технологічність, локалізація та аналітичні можливості — суттєво переважають слабкі. Значні зовнішні можливості, зокрема діджиталізація агросектору, створюють сприятливі умови для розвитку. Загрози можуть бути зменшені завдяки адаптації продукту та правильній ринковій стратегії. Це підтверджує перспективність проєкту.

У таблиці сформовано альтернативи ринкової поведінки стартапу та оцінено ймовірність отримання ресурсів і строки реалізації. Це дозволяє визначити найбільш ефективні напрямки впровадження продукту та раціонально планувати розвиток.

Таблиця 16 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ n/n	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	SaaS-платформа для середніх і великих господарств (передплата за гектар)	Висока – можливі платні пілоти, підписка	1–2 роки до виходу на самоокупність
2.	White-label рішення для IT-інтеграторів та агрокомпаній	Середня – потрібні переговори з великими партнерами	2–3 роки
3.	Сервіс «аналітика під ключ» (звіти + консалтинг)	Висока на старті, потребує багато людських ресурсів	Можна запустити за 6–12 місяців
4.	Академічний/освітній продукт для університетів та дослідницьких центрів	Середня, залежить від грантів та контрактів	1–2 роки

Отримані результати свідчать, що найбільш реалістичною стратегією виходу на ринок є модель SaaS у поєднанні з аналітичним сервісом під ключ. Інші стратегії можуть бути реалізовані на наступних етапах розвитку стартапу. Аналіз строків та ресурсного забезпечення дозволив визначити оптимальний порядок реалізації стратегічних ініціатив.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

Таблиця присвячена вибору цільових груп споживачів і визначенню їх готовності до прийняття продукту, рівня конкуренції та складності виходу на ринок. Це дає змогу сфокусувати маркетингову діяльність на найперспективніших сегментах.

Таблиця 17 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ n/n	Опис профілю цільової групи	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
----------	-----------------------------	---	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------

	потенційних клієнтів		групи (сегменту)		
1.	Середні фермерські господарства (1–10 тис. га)	Висока – шукають недорогі інструменти оптимізації	Значний, багато таких господарств	Середня	Відносно простий – короткий цикл прийняття рішень
2.	Великі агрохолдинги	Висока, але потребують складних інтеграцій	Високий потенціал виручки на клієнта	Висока, вже використовують рішення конкурентів	Складніший вхід (тендери, пілоти)
3.	Малі фермери й кооперативи	Середня – низький рівень цифровізації	Сумарно значний, але низький чек	Низька	Вхід через партнерів, навчальні програми
4.	Страхові компанії / банки	Середня	Обмежена кількість, але великий чек	Середня	Потрібні спеціальні модулі звітності
Які цільові групи обрано: на першому етапі – середні та великі господарства, на другому – страхові/банки (через окремі модулі), з часом – малі фермери через спрощені пакети. Тип стратегії охоплення – диференційований маркетинг (різні програми для середніх і великих клієнтів).					

Проведений аналіз показав, що найпривабливішими сегментами є середні та великі агропідприємства, для яких продукт створює найбільшу цінність. Ці сегменти характеризуються високим рівнем попиту та готовністю впроваджувати інноваційні рішення. Отримані результати дозволяють сформулювати пріоритети просування та визначити ефективну стратегію охоплення ринку.

У таблиці визначено базову стратегію розвитку стартап-проекту на основі обраних моделей ринкової поведінки та конкурентних позицій. Аналіз дозволяє встановити, яку з трьох стратегій Портера — лідерства за витратами, диференціації чи спеціалізації — доцільно застосувати.

Таблиця 18 Визначення базової стратегії розвитку

№ n/ n	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентні позиції відносно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	SaaS-платформа для середніх/великих господарств	Диференційований маркетинг	Локалізація, точні індекси, простота, інтеграції, гнучка ціна	Стратегія спеціалізації на сегменті точного землеробства з елементами диференціації
2.	Аналітика під ключ	Фокус на клієнтах без власного аналітичного відділу	Експертиза, сервіс, гнучкість	Поєднання спеціалізації та диференціації (якість сервісу)

Проведений аналіз показав, що найефективнішою для проекту є стратегія спеціалізації з елементами диференціації. Такий підхід дозволяє максимально врахувати потреби цільових сегментів і створити конкурентну перевагу за рахунок унікальних властивостей продукту. Обрана стратегія забезпечує чітке позиціонування та сприяє стабільному розвитку стартапу.

У таблиці визначено базову стратегію конкурентної поведінки стартапу, враховуючи умови ринку та позиції конкурентів. Аналіз дає змогу встановити, чи є проєкт першопрохідцем і які підходи до конкурентної боротьби є найбільш ефективними.

Таблиця 19 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ n/n	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні, на ринку вже є рішення, але мало	Поєднання: залучення нових (ще не оцифрованих)	Базові функції (NDVI-карти) будуть аналогічні,	Стратегія виклику лідера у локальному

	локалізованих	господарств та переманювання незадоволених існуючими сервісами	але доповнені рекомендаціями та локальними модулями	сегменті + флангова атака через локалізацію, сервіс, ціну
--	---------------	--	---	---

Результати аналізу показують, що стартап може застосовувати стратегію виклику лідеру в поєднанні з фланговою атакою, використовуючи локальні переваги та простоту інтерфейсу. Це дозволяє зайняти окрему нішу на ринку та поступово розширювати частку. Обрана стратегія враховує як наявні можливості, так і специфіку конкурентного середовища.

У таблиці наведено елементи позиціонування продукту відповідно до вимог цільового сегменту та базової стратегії розвитку. Це дозволяє сформувати ключові асоціації, які мають визначати сприйняття бренду на ринку.

Таблиця 20 Визначення стратегії позиціонування

№ n/n	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренти спроможні позиції власного стартап проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Надійні карти стану посівів, швидке виявлення проблем	Спеціалізація + диференціація	Висока точність індексів	«PlantScan – надійний щоденник здоров'я ваших полів»
1.	Простота використання, мінімум навчання	Спеціалізація + диференціація	Інтуїтивний інтерфейс, мобільний додаток	«Система, якою може користуватися кожен агроном без GIS-освіти»
2.	Агрономічні рекомендації, а не просто карти	Спеціалізація + диференціація	Вбудовані сценарії внесення, попередження ризиків	«Не просто карти, а конкретні кроки дій»

3.	Локальна підтримка і сервіс	Спеціалізація + диференціація	Українська команда, швидка підтримка	«Український продукт для українського агробізнесу»
----	-----------------------------	-------------------------------	--------------------------------------	--

Аналіз показав, що найбільш ефективне позиціонування пов'язане з точністю аналітики, простотою використання та локалізацією. Такий підхід формує у споживачів чітке уявлення про цінність продукту та забезпечує відмінність від конкурентів. Системне позиціонування сприятиме ефективнішому просуванню стартапу на ринку.

4.3 Розроблення маркетингової програми стартаппроекту

У таблиці визначено ключові вигоди для цільових груп споживачів та порівняльні конкурентні переваги продукту. Такий аналіз допомагає уточнити ринкову пропозицію й підсилити маркетингову комунікацію.

Таблиця 21 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ n/n	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Зменшення витрат на ресурси	Автоматичні карти диференційованого внесення	Локальні алгоритми, комбінація супутника і дронів, точніші карти
2.	Підвищення врожайності	Раннє виявлення стресу рослин	Частіший моніторинг, рекомендації дій
3.	Економія часу агронома	Інтуїтивний інтерфейс	Простіші у використанні інструменти порівняно з GIS-системами
4.	Об'єктивні дані для партнерів	Стандартизовані звіти для страхових/банків	Адаптація форматів під локальних гравців

Результати показали, що продукт має чітко виражені конкурентні переваги, серед яких економія ресурсів, раннє виявлення проблем та простота використання. Ці фактори є вирішальними для споживачів у

процесі вибору рішення. Використання цих переваг дозволить сформувати сильну ціннісну пропозицію на ринку.

У таблиці за моделлю трьох рівнів товару визначено основні характеристики продукту, його реальне виконання та елементи підкріплення. Особливу увагу приділено класифікації властивостей за їх типами та впливом на споживача.

Таблиця 22 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Базова потреба – контроль стану посівів і прийняття рішень щодо живлення, захисту й зрошення на основі вегетаційних індексів. Основна функціональна вигода – зниження витрат і підвищення урожайності.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Автоматизований розрахунок вегетаційних індексів (NDVI, EVI, SAVI) 2. Система раннього виявлення стресів рослин 3. Автоматичні рекомендації щодо дій (живлення, ЗЗР, полив) 4. Зростання врожайності через точний контроль стану полів 5. Простий та інтуїтивний інтерфейс користувача	1. Нм 2. Нм 3. Нм 4. Нм 5. Нм	1. Тх 2. Вр 3. Ор 4. Вр 5. Ор
	Якість: Відповідність внутрішнім стандартам точності, тестування на реальних полях, контроль помилки класифікації, SLA за часом оновлення даних.		
	Пакування Веб-кабінет; брендovanі матеріали, онбордінг-путівник.		
	Марка: PlantVision UA		
III. Товар із підкріпленням	До продажу безкоштовний тест, демонстрації, навчання.		
	Після продажу техпідтримка, оновлення функціоналу, консультації агрономів, імпорту/експорту даних.		

За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Моделі обробки й інтерпретації індексів (ноу-хау), база навчальних даних, можливе патентування окремих методик, бренд і репутація, контракти з партнерами.

Аналіз показав, що товар має значну кількість нематеріальних характеристик, які формують основну цінність для користувача: автоматизація, точність аналітики та сервісні можливості. Додаткові елементи підкріплення забезпечують позитивний користувацький досвід і підвищують довіру до бренду. Структурований опис товару дозволяє краще обґрунтувати його привабливість та конкурентоспроможність на ринку.

Таблиця визначає межі ціноутворення майбутнього продукту, ґрунтуючись на аналізі цін конкурентів, доходів цільових груп та рівня витрат споживачів. Це дозволяє встановити економічно обґрунтовані параметри ціни.

Таблиця 23 Визначення меж встановлення ціни

№ n/n	Рівень цін на товари замінники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі вста новлення ціни на то вар/послугу
1.	Консалтинг «під ключ» – висока разова оплата	Міжнародні платформи – висока щорічна ліцензія	Великі/середні господарства мають бюджет на ІТ, але чутливі до ROI	Нижня межа – щоб покривати собівартість хмари та підтримки; верхня – трохи нижче за міжнародні аналоги, з гнучкою системою знижок за площу

Аналіз показав, що оптимальною є стратегія ціноутворення в середньому сегменті з можливістю гнучкого коригування залежно від типу клієнта. Вартість продукту має бути нижчою за міжнародні аналоги, але достатньою для покриття витрат розвитку. Це робить модель ціноутворення стійкою та конкурентною.

У таблиці розглянуто оптимальну систему збуту продукту з урахуванням поведінки споживачів та специфіки ринку. Оцінено функції продажу та глибину каналів реалізації.

Таблиця 24 Формування системи збуту

№ n/ n	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Середні фермерські господарства – рішення приймає власник або головний агроном, часто напрямую	Пошук клієнтів, пілотні проєкти, навчання, підтримка	Прямий канал: виробник клієнт	Власні продажі через сайт, конференції, прямі контакти
2.	Великі агрохолдинги – тендери, багаторівневе погодження	Передпродажні і консультації, підготовка ТЗ, інтеграції	Короткий канал: виробник інтегратор клієнт	Поєднання прямих продажів із партнерським і ІТ-інтеграторами
3.	Малі фермери – купують через знайомих/дилерів в техніки	Демонстрації, навчання, базова підтримка	Більш глибокий канал: виробник партнер (дилер техніки, кооператив) фермер	Партнерська мережа дилерів і кооперативів, онлайн-реєстрація

Аналіз підтвердив, що найбільш ефективною моделлю збуту є поєднання прямих продажів для великих і середніх підприємств та партнерських каналів для малих фермерів. Така модель забезпечує охоплення різних сегментів і дозволяє мінімізувати витрати на розширення збутової мережі.

Таблиця описує концепцію маркетингових комунікацій, спрямовану на інформування та залучення цільових сегментів. У ній визначено ключові канали, повідомлення та позиціонування продукту.

Таблиця 25 Концепція маркетингових комунікацій

№ n/ n	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Середні фермери – активні в профільних спільнотах, читають агросайти	Агровиставки, вебінари, соцмережі, email-розсилки	Економія ресурсів, простота використання	Пояснити економічний ефект, показати кейси	«Побач свій врожай до збирання» – історії успіху господарств
2.	Великі агрохолдинги – орієнтація на цифри та інтеграції	Прямі переговори, профільні конференції, бізнес-ЗМІ	Надійність, масштабованість, інтегрованість	Позиціонувати сервіс як стратегічного партнера	«Аналітика полів як частина вашої корпоративної ERP-екосистеми»
3.	Малі фермерські господарства – реагують на прості й практичні меседжі	Соцмережі, YouTube-огляди, демонстраційні дні	Простота, доступність	Показати, що сервіс не «тільки для великих»	«Моніторинг полів у твоєму смартфоні» – короткі відео-демо

Проаналізовані комунікаційні інструменти показали, що найбільш ефективними є поєднання цифрових каналів, галузевих заходів та персоналізованих консультацій. Така стратегія дозволяє охопити різні групи клієнтів і забезпечити стабільне формування попиту. Вибрані підходи створюють основу для успішного просування стартапу на ринку.

4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проєкту та оцінювання його економічної ефективності

Бізнес-модель Canvas проєкту ґрунтується на створенні комплексного рішення для автоматизованого аналізу росту рослин, яке інтегрує програмно-аналітичну платформу MATLAB, модулі обробки зображень та систему візуалізації даних. Такий підхід забезпечує можливість оперативного отримання інформації про стан рослинності на великих площах, включаючи важкодоступні території, де традиційні методи моніторингу є недостатньо ефективними або занадто витратними. Модель також охоплює ключові елементи управління проєктом, зокрема партнерства, ресурси, сегменти споживачів та фінансові потоки.



Рис. 40 Бізнес-модель

CANVAS-модель демонструє цілісність і стратегічну узгодженість стартапу. Чітко визначені сегменти клієнтів та джерела доходу підтверджують комерційний потенціал продукту на ринку агроаналітики.

Визначені ресурси та партнери забезпечують технічну стійкість і можливість подальшого масштабування системи. Унікальна ціннісна пропозиція підкреслює конкурентні переваги сервісу, зокрема автоматизацію аналізу та високоточність розрахунків індексів росту.

Команда складається з фахівців, які забезпечують повний цикл створення та впровадження системи. Структуризація обов'язків дасть чітке уявлення про майбутню команду та способи досягнення коректної та ефективної роботи системи.

Таблиця 26 Склад команди проєкту

№ n/n	Посада	Обов'язки
1.	Керівник проєкту	Відповідає за стратегічне планування, координацію та взаємодію з партнерами.
2.	Інженер-програміст MATLAB	Займається розробкою алгоритмів обробки зображень, розрахунку індексів і побудови модулів аналізу.
3.	Фахівець з агрономії	Оцінює якість даних, формує агрономічні рекомендації та проводить валідацію моделей.
4.	Аналітик даних / ML-інженер	Створює та навчає моделі прогнозування розвитку рослинності.
5.	Веб-розробник	Відповідає за створення дашбордів і модулів візуалізації.
6.	Маркетолог	Розробляє стратегію просування та взаємодії з цільовою аудиторією.

Після аналізу складу команди можна зробити висновок, що проєкт має збалансовану структуру спеціалістів, які забезпечують повний цикл розробки та підтримки системи. Наявність експертів із різних галузей дозволяє якісно поєднати технічні, аналітичні та агрономічні аспекти. Така команда сприяє ефективному управлінню ресурсами, зменшенню ризиків та підвищенню ймовірності успішної реалізації стартапу

Перед формуванням календарного плану було проведено аналіз етапів розробки та впровадження системи, що дозволило визначити логічну послідовність робіт, необхідні ресурси та тривалість кожного етапу. Планування виконання завдань у часовому вимірі забезпечує ефективну організацію діяльності команди та контроль за відповідністю строків поставленим цілям.

Таблиця 27 Календарний план

№ n/n	Проміжок часу	План
1.	1-2 місяць	аналіз вимог, формування технічного завдання, збір початкових даних
2.	3–4 місяць	розробка алгоритмів MATLAB, побудова модулів розрахунку NDVI, EVI, SAVI
3.	5–6 місяць	створення системи візуалізації, інтеграція дашборду та API
4.	7 місяць	польове тестування, калібрування моделей, перевірка точності.
5.	8 місяць	запуск MVP, пілотні клієнти.
6.	9–12 місяць	масштабування продукту, маркетингова кампанія, вихід на ринок.

Після аналізу календарного плану можна зробити висновок, що реалізація проекту має чітко структуровану етапність, яка забезпечує поступовий перехід від розробки до тестування та комерціалізації. Такий підхід мінімізує ризики, пов'язані з невизначеністю, та дозволяє оперативно вносити зміни на основі зворотного зв'язку. План демонструє реалістичність термінів і здатність команди забезпечити якісне виконання всіх етапів.

Процес виробництва продукту реалізується у вигляді створення програмно-аналітичної системи, що включає:

розробку алгоритмів обробки зображень у MATLAB;

підготовку та структурування баз даних рослинності;
 створення серверної інфраструктури для автоматичної обробки запитів;
 інтеграцію веб-інтерфейсу для користувачів;
 налаштування модулів експорту звітів та карт.

Виробничий процес не передбачає складського або апаратного циклу, оскільки продукт є цифровим сервісом і базується на програмному забезпеченні

Перед поданням трирівневої моделі було проведено аналіз структури продукту, визначено його функціональні можливості та додаткові сервіси, що формують цінність для кінцевого користувача. Такий підхід дає змогу комплексно оцінити готовий продукт з позиції ринкової привабливості та технічної реалізації, а також розмежувати базові та розширені можливості, важливі для різних сегментів клієнтів.

Таблиця 28 Трирівнева модель продукту

Товар за задумом	Отримання точних оцінок стану рослин за допомогою вегетаційних індексів та рекомендацій для управління посівами.
Товар у реальному виконанні	MATLAB-пайплайн обробки зображень; автоматичний розрахунок NDVI, EVI, SAVI; ML-модулі прогнозування; веб-панель управління;
Товар із підкріпленням	консультації агронома; технічна підтримка; навчальні матеріали; адаптація моделей під регіон клієнта.

Побудована трирівнева модель демонструє логічну структуру продукту, що охоплює як основні функціональні можливості, так і додаткові сервіси, які підсилюють його конкурентні переваги. Поєднання технічної складової, аналітики та сервісної підтримки забезпечує високу

цінність продукту для користувачів. Такий підхід створює передумови для успішної комерціалізації та адаптації рішення під потреби різних сегментів ринку.

Перед формуванням моделі ціноутворення було проаналізовано ринок аграрних цифрових сервісів, конкурентні тарифи та собівартість надання аналітичних послуг. Це дозволило визначити оптимальну структуру цін, яка забезпечує доступність продукту для різних категорій клієнтів та водночас гарантує покриття витрат на розробку і підтримку системи. Обрана тарифна сітка також враховує можливості масштабування сервісу за рахунок підписних моделей.

Таблиця 29 Ціноутворення

Тариф	Ціна	Опис
Basic SaaS	\$50/місяць	До 2 аналізів, базовий дашборд
Pro	\$300/місяць	До 30 аналізів, API, SLA
Разова місія (100–200 га)	\$200–800	Аналіз знімків, звіт, карти
Індивідуальні проєкти	від \$2000	Інтеграції, спеціальні моделі

Запропонована модель ціноутворення є гнучкою та дозволяє адаптувати сервіс під потреби як дрібних фермерських господарств, так і великих агрохолдингів. Поєднання підписних тарифів і разових місій створює стабільну фінансову основу та передбачуваність доходів. Модель також підтримує масштабування продукту

Перед визначенням інвестицій та витрат було здійснено детальний аналіз технічних, ресурсних і організаційних потреб проєкту. Це дозволило виділити ключові статті витрат, що формують початковий бюджет, а також визначити регулярні операційні витрати, необхідні для функціонування сервісу. Такий підхід забезпечує прозорість фінансового

планування та створює основу для оцінки економічної ефективності стартапу[41].

Таблиця 30 Інвестиції та витрати

Початкові інвестиції	Щомісячні витрати	Прогноз доходів
R&D розробка — \$8 000 MATLAB та інструменти — \$2 000 Серверна інфраструктура — \$3 000 Камера/обладнання для калібрування — \$5 000 Маркетинг стартовий — \$2 000 Разом: $\approx$ \$20 000	Сервери — \$300 Підтримка — \$1 200 Маркетинг — \$500 Ліцензії та сервіси — \$200 Разом: $\approx$ \$2 200/місяць	1–3 місяць: \$1 500/міс 4–12 місяць: \$6 000/міс Річний прогноз: \$30 000–45 000

Проведений аналіз інвестицій та витрат свідчить про раціональну структуру бюджету стартапу. Основні капітальні вкладення зосереджені на програмній розробці та інфраструктурі, що мінімізує залежність від дорогих апаратних компонентів. Щомісячні витрати залишаються передбачуваними й контрольованими, що дозволяє забезпечити стабільність фінансових потоків. Така модель витрат сприяє швидкій окупності проєкту та зменшує ризики при виході на ринок.

Оцінка економічної ефективності

Точка беззбитковості

Середній дохід з клієнта: \$300/міс

Валова маржа: 60% (\$180/клієнт)

CAPEX = \$20 000

TBZ = $20\,000 / 180 \approx 112$ клієнт-місяців

При 20 активних клієнтах $\rightarrow \approx 5.6$ місяців продажів.

Термін окупності

12–18 місяців за помірного зростання клієнтської бази.

Ризики та їх мінімізація

Точність моделей: локальна калібровка.

Дані низької якості: підтримка різних сенсорів.

Конкуренція: фокус на точності MATLAB-алгоритмів.

Витрати на обчислення: оптимізація пайплайну, використання MATLAB Runtime.

Висновки до розділу 4

Проведений аналіз ринку, конкурентного середовища, технологічних можливостей та цільових груп споживачів дає підстави стверджувати, що проєкт має реальні можливості для ринкової комерціалізації. Ринок аграрної цифровізації демонструє стаłe зростання, а попит на системи моніторингу стану рослин з використанням вегетаційних індексів продовжує збільшуватися. Це зумовлено потребою аграрних підприємств у підвищенні врожайності, зниженні витрат та переході до технологій точного землеробства. Аналіз показав наявність достатньої рентабельності роботи на ринку та перспективи масштабування проєкту.

За результатами оцінки потенційних груп споживачів встановлено, що найбільш перспективними сегментами є середні та великі агрохолдинги, страхові компанії та малі фермерські господарства. Кожен із сегментів має конкретні потреби, які проєкт здатен задовольнити за рахунок високої точності аналітики, автоматизації процесів, простоти використання та локалізації. Бар'єри входження на ринок є помірними, а стан конкуренції характеризується монополістичною структурою з переважанням нецінових форм конкурентної боротьби. Це створює умови для позиціонування нового продукту через диференціацію та спеціалізацію. Порівняльний аналіз сильних і слабких сторін підтвердив високу конкурентоспроможність проєкту.

На основі розглянутих альтернатив ринкової поведінки визначено, що найбільш доцільним є впровадження SaaS-моделі з елементами

сервісної аналітики «під ключ», оскільки вона забезпечує оптимальне співвідношення витрат, швидкості впровадження та масштабованості. Такий варіант дозволяє обслуговувати різні сегменти ринку, а також надає можливість поступового розширення функціоналу відповідно до потреб клієнтів.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, можна зробити висновок, що подальша імплементація проєкту є доцільною та обґрунтованою. Стартап володіє технологічними, ринковими та конкурентними передумовами для успішного виходу на ринок та стабільного розвитку. Реалізація проєкту здатна забезпечити економічний ефект для споживачів і створити конкурентоспроможний продукт у сфері аграрних цифрових технологій.

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було розроблено автоматизовану систему на основі спектральних даних та вегетаційних індексів, орієнтовану на отримання надійних результатів з максимальним комфортом для користувача. На початковому етапі було всебічно проаналізовано сучасний стан технологій агромоніторингу, тенденції у розвитку точного землеробства та існуючі системи спектрального моніторингу рослин. Визначено, що сучасні аграрні підприємства потребують доступних, точних і швидких засобів для оцінювання стану рослин на великих ділянках, у той час як традиційні методи польових вимірювань часто є недостатньо ефективними та залежать від суб'єктивних чинників. Дослідження показало, що спектральний аналіз та індексні методи займають провідні позиції серед актуальних технологій моніторингу рослинності через їх об'єктивність, інформативність та здатність до автоматизації.

Особливу увагу було приділено вегетаційним індексам, що дозволяють характеризувати щільність біомаси, рівень зеленості, наявність стресових факторів і загальний розвиток рослинності. Було проаналізовано їх математичні формули, діапазони значень, інтерпретаційні можливості та обмеження, що стало основою для формування алгоритмічної частини розробленої системи.

Виконано порівняльний аналіз спектральних сенсорів і наявних апаратних рішень. Встановлено основні відмінності між ними за точністю, спектральною роздільністю, числом каналів, вартістю та можливостями інтеграції. Це дало змогу встановити найкращі апаратні ресурси для збору даних, необхідних для точного розрахунку вегетаційних індексів.

У процесі виконання задачі була спроектована архітектура програмного забезпечення, встановлено вимоги до функціональності та створено модулі для обробки вхідних зображень, обчислення індексів і візуалізації результатів. Запроваджена система забезпечує автоматизацію всього технологічного процесу — від збору спектральних даних до створення інтерпретованих аналітичних висновків. Практичним результатом цієї роботи є створення автоматизованої системи аналізу стану рослин, яка забезпечує повний цикл обробки спектральних даних: від імпорту зображень та їх початкової обробки до обчислення індексів і підготовки візуалізованих аналітичних результатів. У структурі системи впроваджено модулі для фільтрації та нормалізації зображень, розрахунку ключових вегетаційних індексів, аналізу отриманих даних та візуалізації інформації у формі графіків, карт або текстових висновків.

Тестування програмного забезпечення показало правильність реалізованих алгоритмів, стабільність роботи системи та її здатність точно відображати стан рослинності за спектральними характеристиками. Аналіз показників підтвердив, що створена система відповідає заданим вимогам і є придатною для застосування в галузі точного землеробства, агромоніторингу, наукових дослідженнях та навчальних курсах.

Результати діяльності показують практичну значущість розробленої системи, яка може бути застосована в аграрних компаніях, наукових організаціях та в області точного сільського господарства. Використання цієї технології допомагає підвищити ефективність моніторингу рослинного покриву, своєчасно виявляти проблеми, оптимізувати витрати ресурсів та вдосконалювати якість управлінських рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fuzy A. Selection of plant physiological parameters to detect stress effects in pot experiments using principal component analysis / A. Fuzy, R. Kovacs, I. Cseresnyes, et al. // *Acta Physiologiae Plantarum*. – 2019. – 41(5), 56. – p. 10.
2. Тягур В. М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / В. М. Тягур, А. В. Муравьев, О. К. Кучеренко // *Оптический журнал*. – 2014. – том 81. – вып. №4. – С. 42-47.
3. Ознаки недостатнього освітлення на рослин [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://wethewild.co/blogs/plant-advice/5-signs-your-houseplants-arent-getting-enough-light>.
4. Основні можливості Planteye [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://phenospex.com/products/plant-phenotyping/planteye-f500-multispectral-3d-laser-scanner/>.
5. FlourPen дані [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://handheld.psi.cz/products/fluorpen-and-par-fluorpen/>.
6. Хвороби рослин при відсутності світла [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://myplantin.com/diseases/lack-of-light>.
7. Параметри від виробника [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://ag.dji.com/p4-multispectral>
8. Кучеренко О. К. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Тягур // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2012. – вип. №5. – С. 114-117.
9. Ознаки недостатнього поливу [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.airowater.com/blog/effect-of-water-scarcity-on-plants>.

10. Galli L. Multispectral image segmentation via multiscale weighted aggregation method / L. Galli, D. de Candia // in Proc. SPIE 5982, Image and Signal Processing for Remote Sensing XI. – 2005.
11. Сучасні види контролю росту рослин [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.eolss.net/sample-chapters/c09/e6-199-02-00.pdf>.
12. Муравьёв А.В. Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов / А.В. Муравьёв, О.К. Кучеренко // Наука и техника. – 2015. – № 4. – С. 32–37.
13. Zhang J. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: a review / J. Zhang, Y. Huang, R. Pu, P. Gonzalez-Moreno, L. Yuan, K. Wu, W. Huang // Comput. Electron. Agric. – 2019. – 165. – 104943.
14. NDVI показник [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://blog.onesoil.ai/en/what-is-ndvi>
15. Fahad S. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options / S. Fahad, A.A. Bajwa, U. Nazir, S.A. Anjum, A. Farooq, A. Zohaib, S. Sadia, W. Nasim, S. Adkins, S. Saud, M.Z. Ihsan, H. Alharby, C. Wu, D. Wang, J. Huang // Front. Plant Sci. – 2017. – 8. – p. 1147.
16. Кучеренко О.К. Вплив температури на абераційні властивості ІЧ об'єктивів / О.К. Кучеренко, О.В. Муравйов, Д.О. Остапенко. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 1. – С. 99-105.
17. Jyoti Prakash Hati et al. Mangrove classification using airborne hyperspectral AVIRIS-NG and comparing with other spaceborne hyperspectral and multispectral data // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2021. – Vol. 24. – Issue 2. – pp. 273-281.
18. Gholizadeh A. Detecting vegetation stress as a soil contamination proxy: a review of optical proximal and remote sensing techniques / A.

- Gholizadeh, V. Korpachova // Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2019. – 16 (5). – pp. 2511-2524.
19. Муравьёв А. В. Пассивная атермализация оптической системы медицинского термографа / А. В. Муравьёв // TRENDS OF MODERN SCIENCE. – vol. 15. – 2018. – pp. 88-91.
20. Вегетаційні індекси [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://eos.com/blog/vegetation-indices/>
21. Zapata-Londono J. Comprehensive Review of Optical and AI-Based Approaches for Plant Growth Assessment / J. Zapata-Londono, J. Botero-Valencia, V. Garcia-Pineda, E. Reyes-Vera, R. Hernandez-Garcia // Agronomy. – 2025. – 15(8):1781.
22. Кучеренко О.К. Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем / О.К. Кучеренко, А.В. Муравьёв // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2012. – вип. № 43. – С. 46–53.
23. Chen, Assaf & Orlov-Levin, Valerie & Meron, Moshe. (2019). Applying high-resolution visible-channel aerial imaging of crop canopy to precision irrigation management. Agricultural Water Management. 216. 196-205.
24. Можливості Matlab [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/help/images/image-analysis.html>
25. Муравйов О. В. Компенсація терморозфокусування оптичної системи тепловізора та перспективи його використання в медичній діагностиці / О. В. Муравйов, О. О. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2017. – вип. №1. – С. 124-131.
26. Визначення цукрів у винограду [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/help/images/predict-sugar-content-in-grape-berries-using-pls-regression-on-hyperspectral-data.html>

27. Buriak J.M. Nano and plants / J.M. Buriak, L.M. Liz-Marzán, W.J. Parak, X. Chen // ACS Nano. – 2022. – 16 (2). – pp. 1681-1684.
28. Можливості обробки зображень Python [Електронний ресурс]– режим доступу до ресурсу: <https://www.geeksforgeeks.org/python/image-processing-in-python/>
29. Вплив різних видів освітлення [Електронний ресурс]– режим доступу до ресурсу: <https://www.agcled.com/blog/the-effect-of-all-kinds-of-light-on-plants-atop-led-grow-light.html>.
30. Сторожик Д. В. Автоматизація процесу теплового неруйнівного контролю шляхом застосування методу комплексування термограм / Д. В. Сторожик, А. Г. Протасов, О. В. Муравйов, В. Ф. Петрик, Д. В. Петренко // Техн. діагностика та неруйнівний контроль. – 2022. – №2. – С. 20-23.
31. Сторожик Д. В. Комплексування мультиспектральних зображень, як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації / Д. В. Сторожик, О. В. Муравйов, А. Г. Протасов, В. Г. Баженов, Г. А. Богдан // Наукові вісті КПП. – 2020. № 2. – С. 82-87.
32. Муравьёв А.В. Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа / А.В. Муравьёв, Е.А. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2016. – вип. №4. – С. 195-199.
33. Вплив інфра червоного світла на рослин [Електронний ресурс]– режим доступу до ресурсу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC550395/pdf/plntphys00407-0081.pdf>.
34. Вплив червоного світла на рослин [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/red-light.pdf>.

35. Живкович А. В. Современные технологии бесконтактного измерения температуры / А. В. Живкович, А. В. Муравьев // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований - 2020», 07-15 июля 2020, Пшемисль, Польша. – *Przemyśl : Nauka i studia*, 2020. – Том. 7. – С. 110-115.
36. Вплив освітлення на рослини [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.trees.com/gardening-and-landscaping/how-light-affects-plant-growth>.
37. Муравьев А. В. Основные тенденции, проблемы и перспективы развития дисплейной наноэлектроники / А. В. Муравьев // Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі: 71 матеріали 2-гої науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Польща, Люблін, 2018. – С. 10-11.
38. Довбиш І. О. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА / І.О. Довбиш, О.В. Муравйов, Р.М. Галаган, Г.А. Богдан, А.С. Момот // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Том. 34 (73). – № 5. – С. 16-21.
39. Морозов М. А. Современная лазерная дальнометрия / М. А. Морозов, А. В. Муравьев // Новые направления развития приборостроения: материалы 9-й международной науднотехнической конференции молодых ученых и студентов, 20-22 апреля. – Минск, Беларусь, 2016. – С. 38.
40. Назарчук О. О. Компенсація терморозфокусування оптичної системи термографа / О. О. Назарчук, О. В. Муравйов. // Біомедична інженерія. – 2017. – №5. – С. 66-67.
41. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для

- студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
42. Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.
- 43.- Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
44. Комп'ютерне проєктування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
45. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
46. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.