

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ І ГЕОІНФОРМАТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Освітнього ступеня «Магістр»

на тему: **“Дослідження методів збору фотограмметричних даних для моніторингу рослинності на угіддях фермерського господарства за даними аерознімань з БПЛА”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ЗВ-63
Спеціальності 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)

Папроцький Василь-Павло Романович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: Куліковська О.Є.
(Прізвище та ініціали)

Рецензент: _____
(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024

Дослідження методів збору фотограмметричних даних для моніторингу рослинності на угіддях фермерського господарства за даними аерознімань з БПЛА. Папроцький Василь-Павло Романович. Магістерська кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет природокористування, 2023, – 60 с. текстової частини, 3 таблиці, 19 рисунків, 25 літературних джерел.

В роботі описано теоретичні та технологічні аспекти отримання інформації про стан рослинності на основі матеріалів багатоспектрального аерознімання полів з безпілотних літальних апаратів. Основне застосування такі зображення знаходять в системах агротехнічного моніторингу і є важливою частиною системи точного землеробства. В роботі виконано експериментальні дослідження з метою створення цифрових ортофотопланів, моделей рельєфу поля та карт вегетаційних індексів. Доведено високу ефективність методики дослідження стану полів із застосуванням матеріалів багатоспектрального аерознімання з безпілотних літальних апаратів. Розглянуті питання охорони довкілля та охорони праці. Сформовано рекомендації, висновки та пропозиції.

Ключові слова: *багатоспектральне аерознімання полів з безпілотних літальних апаратів, цифрове моделювання сільськогосподарських угідь, карта поля, карти вегетаційних індексів.*

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Застосування цифрових фотограмметричних технологій для забезпечення потреб сільськогосподарського виробництва.	
1.1 Фотограмметричні технології як складова точного землеробства.	7
1.2 Збір геоданих безпілотними літальними апаратами.	12
1.3. Картографічний моніторинг полів за матеріалами аерознімань.	
1.3.1.Картографування полів.	24
1.3.2. Принципи створення картографічних моделей рослинності	
2 Методика моніторингу культурної рослинності за аерознімками.	
2.1 Моніторинг сільськогосподарських угідь з допомогою БПЛА	29
2.2 Методика створення індексних карт за аерознімками, отриманими цифровими RGB та NDVI фотокамерами.	32
3 Моніторингові дослідження рослинності за матеріалами аерознімання з БПЛА.	
3.1 Фотограмметричне опрацювання матеріалів аерознімання угідь фермерського господарства.	36
3.2 Робочий процес фотограмметричного опрацювання знімків в програмі OpenDroneMap	41
4 ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ.	49
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	53
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	56
БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК	58

ВСТУП

Актуальною тенденцією останнього часу є поширення технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в сфері сільськогосподарського виробництва. Активно впроваджуються методики вивчення стану полів на основі отриманої від безпілотників інформації. Набувають поширення технології точного землеробства, які передбачають серед іншого й цифрове картографування полів та постійний дистанційний моніторинг розвитку посівів, насаджень.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для аерознімання полів є ефективним і найбільш оперативним методом збору інформації. При цьому застосовуються знімальна апаратура яка фіксує відбивні властивості поверхні ґрунту та рослин. Опрацювання результатів знімань подають у формі карт полів та карт вегетаційних індексів. Всі етапи збору та опрацювання даних автоматизовані.

Завданням даної кваліфікаційної роботи є систематизація наукових та методологічних основ здійснення дистанційного збору спектральної інформації про стан рослинності на полях з допомогою аерознімання з безпілотних літальних апаратів та експериментальне доведення ефективності методів створення карт полів.

Методологічною основою дослідження є літературний аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних вчених з проблем застосування БПЛА в сфері агровиробництва.

Предметом досліджень є методика застосування розміщених на борту БПЛА пристроїв для збору спектральної та просторової інформації.

Об'єктом досліджень є поля аграрних підприємств.

1.Застосування цифрових фотограмметричних технологій для забезпечення потреб сільськогосподарського виробництва.

1.1. Фотограмметричні технології як складова точного землеробства.

Сьогодні у багатьох галузях промисловості і обслуговування застосовуються у виробничому процесі матеріали аерокосмічних знімачів. Зокрема трендом останнього часу є поширення технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

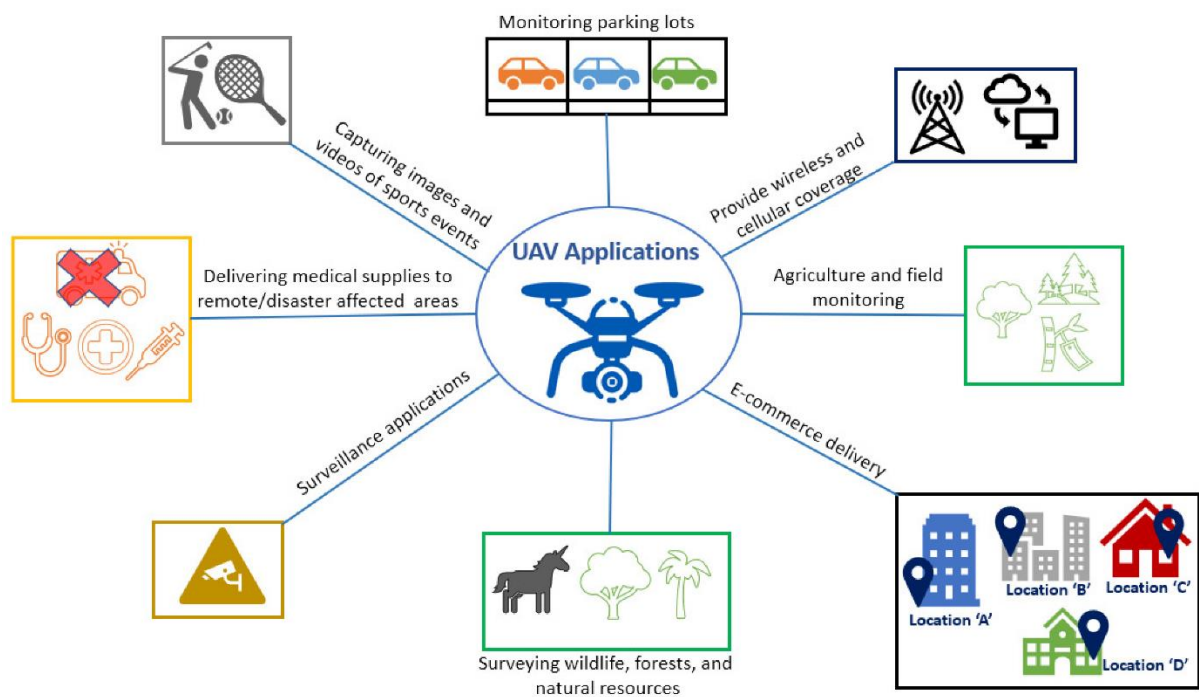


Рис.1.1. Сфера застосувань БПЛА.

Виробництво сільськогосподарської продукції також не відстає від технічних інновацій і активно застосовує такого роду матеріали для отримання інформації про стан полів, контролю виконання агротехнічних міроприємств, стеженням за розвитком загрозливих для урожаю проявів тощо. З широким поширенням транспортних технологій безпілотних наземних та літальних апаратів саме сільськогосподарська галузь є лідером з їхнього впровадження.

Космічні та аеро знімальні системи, що здійснюють дистанційне спостереження за біофізичними процесами, сприяють збільшенню ефективності аграрного виробництва. У впроваджені таких систем зацікавлені як фермери для отримання більшого прибутку, так і уряди для зміцнення продовольчої безпеки в масштабах країни [7].

Сучасний світ пов'язаний із даними. Організації в сільськогосподарському секторі економіки використовують дані, щоб отримати точне розуміння кожної деталі сільськогосподарського процесу, від розуміння кожного акра поля до моніторингу всього ланцюга постачання продукції до отримання глибоких даних про процес генерування врожаю. Набувають поширення технології точного землеробства, які засновуються на усвідомленні того, що сільськогосподарські угіддя неоднорідні за природніми властивостями (рельєф, хімічний склад ґрунтів тощо) і потрібно диференціювати агротехнології для максимально ефективного використання земель. Тому саме технології точного землеробства направлені на підвищення продуктивності, зменшення собівартості продукції і збереження продуктивності земель. Розумне фермерство – це застосування інформаційних технологій для управління фермами. Цей підхід дає фермерам інструменти та стратегії для підвищення врожайності та сталості сільськогосподарського виробництва. Розумне землеробство означає використання технологій і пристроїв управління інформацією та даними в сільському господарстві, включаючи програмне забезпечення, датчики та робототехніку, для підвищення продуктивності та ефективності сільськогосподарських систем.

Розумне сільське господарство — це активна сфера, яка створює нові можливості для майбутнього. У центрі розумного сільського господарства знаходяться сільськогосподарські роботи, серед яких широко застосовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА). БПЛА мають значно скорочений робочий цикл збору та опрацювання даних, що призводить до підвищення точності вимірювань і продуктивності.

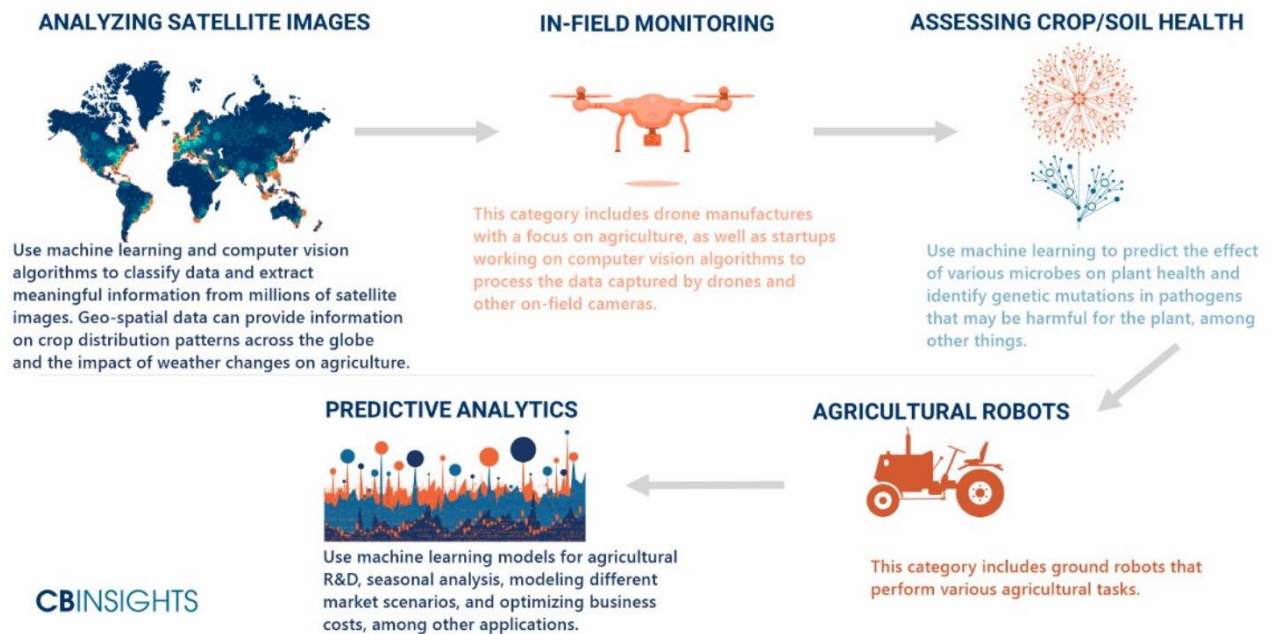


Рис.1.2. Екосистема розумного сільського господарства (база даних CB Insights).

БПЛА не тільки дешевші, ніж більшість інших сільськогосподарських машин, але також ними легко керувати. Крім того, їхнє застосування сприяло розширенню багатьох сфер сільського господарства, включаючи пошук і обприскування інсектицидами та добривами, посів насіння, розпізнавання бур'янів, оцінку родючості, картографування та прогнозування врожаю [12].

Згідно з дослідженням ринку сільськогосподарських БПЛА, проведеним Price-Waterhouse-Coopers, прогнозується, що обсяг ринку сільськогосподарських БПЛА до 2050 року зросте приблизно до 32,4 мільярдів доларів США, що становитиме приблизно 25% світового ринку БПЛА (див. рис. 1) [12]. Основні компанії, що займаються БПЛА, включають DJI, Parrot, Precisionhawk, AGEagle і Trimble Navigation. Незважаючи на те, що різні БПЛА були розроблені та комерціалізовані, деякі проблеми ще потрібно вирішити для передових сільськогосподарських рішень.

Провідні технології включають точне позиціонування, навігацію, елементи керування, зображення, зв'язок, датчики, матеріали, батареї, схеми та двигуни. Залежно від використання БПЛА та характеристик сільськогосподарського сектору потрібні різні технології (наприклад, розробка аерознімального

обладнання, керування пристроями розпилення рідин, телекомунікаційне і навігаційне обладнання тощо).

На рівні окремого господарства дані дистанційного зондування збирають як із супутникових джерел так і шляхом самостійної організації зйомок з безпілотних літальних апаратів. Також широко впроваджуються системи точного землеробства із застосуванням множини датчиків і сенсорів розіщених на наземних транспортних засобах і агрегатах. Ці дані можуть допомогти прийняти перспективні та оперативні рішення при вирощуванні сільськогосподарських культур, надаючи актуальну і в геометричному сенсі точну інформацію щодо:

- картографування полів – відображення рельєфу, дорожньої і орографічної мереж, рослинності, меж, огорджень тощо;
- створення навігаційних карт для впровадження систем паралельного або автоматичного водіння сільськогосподарської техніки;
- картографування однорідності ділянок, для оцінки біомаси, хвороб рослин, враження шкідниками а також картографування поглинання рослинами живильних речовин і стійкості до дії гербіцидів;
- стан ґрунтового покриву для планування структури посівів — виявлення ділянок зі збідненим чи деградованим ґрунтом, доцільність вирощування багаторічних трав чи просапних культур та інше;
- стан посівів — контроль сходу посів, відновлення вегетації озимини після зимівлі, накопичення біомаси та дозрівання, вивлення пригнічення рослин внаслідок поширення хвороб чи шкідників, або нестачею елементів живлення, чи потрібно застосовувати системи поливу чи засоби захисту і т. д.;
- агроекологічні умови на полях - спостереження за метеорологічними, кліматичними та агрохімічними умовами, наприклад, вмістом вологи у ґрунті чи оцінка втрат урожаю через екстремальні чи несприятливі погодні умови, такі як зливи, град та ін.;

- ефективність технологічних процесів — коли і де краще вносити добрива, у якій кількості, чи якісно було зроблено підготовку ґрунту до посіву, як можна пом'якшити дію несприятливих погодних умов;
- історії поля — збір даних про те, що сіяли на полі у попередні роки, який був урожай;
- визначення місць відбору проб — виявлення на полі однорідних та неоднорідних зон за станом ґрунтового покриву та посівів для того, щоб зменшити кількість місць відбору проб для детального аналізу ситуації на полі.

На загально національному рівні для органів державного управління здебільшого застосовують методи супутникового моніторингу, які здатні практично одномоментно охоплювати знімання великих територій і де не є критично важливою надвисока просторова точність даних. Аналіз супутникових зображень забезпечує розуміння сільськогосподарської практики на макрорівні. Аналітики використовують машинне навчання та алгоритми комп'ютерного зору, щоб класифікувати дані та отримувати значущу інформацію з мільйонів супутникових зображень. Важливими напрямками тут є:

- інвентаризація посівів — визначення структури та площ посівів для потреб регіональної та державної статистики;
- прогноз врожаю — для планування економічних показників, прогнозу кон'юнктури ринку, прогнозу ринкових цін на продукцію рільництва, формування державного замовлення на закупівлі, програм субсидіювання виробників та іншого.

Існує також ряд дотичних до аграрного виробництва застосувань правового та екологічного спрямування даних дистанційного зондування. Тут можемо виділити:

- оцінка стану і способу експлуатації сільськогосподарських земель — виявлення нелегального використання земель чи неналежне використання

сільськогосподарських угідь, заростання орних земель дерево-чагарниковою рослинністю, порушення сівозмін;

- страхування сільського господарства;
- контроль агро кліматичних умов - прогноз стресових явищ в агроландшафтах, прогноз впливу змін клімату, планування заходів з адаптації до змін клімату тощо.

1.2. Збір геоданих безпілотними літальними апаратами.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА), дрон (від англ. *drone* — трутень) — літальний апарат, здатний виконувати політ без фізичної присутності людини-пілота на борту. Нормативні документи дають визначення БПЛА як повітряного судна, керування польотом якого і контроль за яким здійснюється дистанційно за допомогою пункту дистанційного пілотування, розташованого поза повітряним судном, або повітряним судном, що здійснює політ автономно за відповідною програмою [8, 9]. БПЛА є компонентом безпілотної літальної системи (БПЛС), яка включає наземний контролер, власне літальний апарат і систему зв'язку та управління.

Політ БПЛА може здійснюватися під дистанційним керуванням людини-пілота або за допомогою автономної системи управління. Технологічний прогрес у конструюванні і виробництві безпілотних літальних апаратів та дистанційних датчиків збільшив нашу здатність збирати точніші дані просторового, спектрального та часового розрізнення, які раніше неможливо було отримати за допомогою звичайних методів зйомок.

Технології моніторингу побудовані на таких властивостях аерознімальних систем, встановлених на борту БПЛА:

- Сприйняття — це здатність аерознімального комплексу розпізнавати значущу інформацію від системи власних бортових датчиків, щоб зрозуміти власний стан і стан навколишнього середовища [15]. Як дані

локалізації (місцеположення під час знімання, маршрут польоту тощо), так і подальша побудова карти покращують сприйняття матеріалів знімання БПЛА. Як автономний суб'єкт, БПЛА повинен розуміти свій власний стан, розташування в просторі, зовнішнє середовище та карту. Сприйняття веде до оптимального планування траєкторії БПЛА і побудови програм опрацювання даних [19].

- Планування передбачає прийняття рішень щодо часу, застосовуваного обладнання, порядку здійснення знімачь та порядку їхнього подальшого опрацювання для досягнення цілей замовника.
- Керування означає здатність БПЛА виконувати заплановані дії. У технології аерознімання з БПЛА завдання локалізації та відображення є залежними.

Склад обладнання сільськогосподарських БПЛА, що використовуються на практиці

Обов'язковою умовою комерційного застосування БПЛА є обчислення позиції та орієнтації апарату відносно геодезичного простору. Недорогі навігаційні датчики споживчого класу, вбудовані в комерційні БПЛА, мають низьку точність, є чутливими до зовнішніх факторів. Параметри датчика також можуть змінюватися залежно від траєкторії та швидкості БПЛА. Об'єднання мульти сенсорних даних суттєво підвищує можливості технології картографування та цифрового представлення навколишнього середовища. Неінтрузивні датчики, такі як лазерні сканери, камери, кодери коліс та інерціальні вимірювальні пристрої (IMU), можуть виявляти рух у середовищі, де локалізація GPS не працює. Ці датчики вимірюють непрямі фізичні величини, а не просторове розташування в геодезичній системі координат. Наприклад IMU вимірює кутову швидкість і прискорення.

Різні датчики, такі як 2D-лазерний сканер і стереокамери, вбудовані в БПЛА, фіксують і об'єднують дані, а також виявляють перешкоди. Поєднання хмар точок LiDAR і зображень камери RGB покращує процес картографування для

представлення навколишнього середовища. Щоб досягти адаптивності, надійності та масштабованості, для кожного датчика необхідне широке налаштування параметрів, а кількість параметрів, які потрібно налаштувати в певному сценарії, динамічно змінюється.

Датчики, які зазвичай використовуються в БПЛА разом із їхніми знімальними системами - це радари, інерціальні вимірювальні пристрої (IMU), приймачі сигналів супутникових навігаційних систем і оптичні датчики перешкод. Вони необхідні для підтримки роботи автопілота і контролю траєкторії польоту в ході виконання польотного завдання. На апаратах професійного рівня встановлюються високоточні навігаційні системи IMU та GPS для прямого фіксування елементів орієнтування отримуваних даних.

Як правило, деякі комерційні радари ближнього радіусу дії працюють на частоті 24 ГГц і виявляють перешкоди на відстані до 100–150 м. Радари дальнього радіусу дії працюють на частоті 77 ГГц і виявляють перешкоди на відстані до 250 м у різних умовах навколишнього середовища. Крім того, вони генерують менше даних і потребують меншої обчислювальної потужності. Датчик IMU вимірює лінійний і кутовий рух за допомогою гіроскопів і акселерометрів. Після підключення до БПЛА вони забезпечують безперервний потік даних, пов'язаних із прискоренням уздовж трьох головних осей і кутовою швидкістю БПЛА. Помилки вздовж осей x і y і частота збору даних є обмеженнями IMU.

Оптичний датчик розпізнає об'єкти за їх текстурою, кольором і контрастністю. Його можна використовувати в БПЛА для виявлення перешкод, пішоходів, інших транспортних засобів тощо. Перспективна камера охоплює горизонтальне поле огляду в межах 30° – 45° , тоді як деякі програми фотограмметричного опрацювання знімків з БПЛА вимагають, щоб камери охоплювали ширший діапазон. Камера може бути монокулярною (лише одна камера), стереоскопічною (дві камери), RGB-D або типом «риб'яче око». Камери RGB-D також можуть вимірювати відстань камери від орієнтира для кожного пікселя.

Цифрова монокулярна RGB камера: монокулярна камера проста та економічно ефективна в експлуатації. Камера проектує 3D-середовище у 2D-формі. Набір зображень калібрується за внутрішніми та зовнішніми параметрами відносно геодезичної системи координат. Коли елементи орієнтування відомі, структуру тривимірної сцени можна отримати з фотограмметричного опрацювання кадрів, які взаємно перекриваються. Глибину або відстань між об'єктами неможливо отримати за допомогою одного зображення. Камери RGB знімають світлонепроникні та неблискучі об'єкти. Темні поверхні додають шум зображенням RGB, а ближчі об'єкти закривають віддалені об'єкти. Відновлення структур 3D-сцени, таких як відстань і розмір об'єктів із постійно змінного кута огляду камери, і одночасна оцінка руху БПЛА спрощується за допомогою обробки хмари точок.

Стереокамери: Стереокамери та камери RGB-D вимірюють відстань між об'єктами та камерою, щоб подолати недоліки монокулярних камер. Стереокамера складається з кількох синхронізованих монокулярних камер. Тривимірне положення кожного пікселя обчислюється на основі фізичної відстані від базової лінії. Стереокамерам потрібна певна обчислювальна потужність на борту для обчислення глибини зображення, стереозбігу та диспаракції пікселів для створення карти глибини в реальному часі. Оцінка глибини для стереокамер порівнює зображення з кількох лівої та правої камер. Стереокамери використовуються як у приміщеннях так і на вулиці, але обмежені довжиною базової лінії, роздільною здатністю камери та точністю калібрування. Все це призводить до порівняно низької точності 3D-реконструкції та розуміння сцени в динамічних, неструктурованих, складних, невизначених і великомасштабних середовищах.

Камера «риб'яче око» - це ширококутна перспективна камера. Ці камери покривають горизонтальне поле зору до 120° – 180° . Однак радіальні спотворення лінз викликають нелінійне відображення пікселів, що робить алгоритми обробки зображень більш складними і менш точними.

Лазерні знімальні системи LiDAR є активним засобом генерування картографічних даних на основі високочастотного вимірювання відстаней і напрямку поширення лазерного променя фіксованої довжини хвилі. Результатом знімань є багатовимірні хмари точок. Однак LiDAR є дуже вартісною технологією, не робить зображень і погано підходить для визначення прозорих поверхонь або водних об'єктів.

Постачальники обладнання для спеціалізованих сільськогосподарських БПЛА пропонують комплексні рішення. Прикладом типового комплексу обладнання для фермерського господарства, що спеціалізується на рільництві є поєднання кількох різнотипних БПЛА з відповідним обладнанням і програмним забезпеченням. Одні з них повинні збирати просторові дані як топографічні так і багатоспектральні щодо стану рослинності. Інші дрони – повинні виконувати агротехнічні операції поливу, внесення добрив і засобів захисту рослин, висіву насіння тощо. Опишемо такий апаратно-програмний комплекс повного циклу від компанії DJI. Він охоплює всі перелічені вище задачі і складається з трьох дронів, програмного забезпечення і наземного обладнання. Це означає, що всі засоби працюють у загальній екосистемі, що спрощує координацію робіт та забезпечує централізоване планування завдань. Комплекс може експлуатуватися силами одного фахівця.

Комплекс складається з трьох БПЛА.

1.Обробіток полів - DJI Agras T16

Призначення БПЛА - розпилення пестицидів, гербіцидів і рідких добрив на рівнинній і гористій місцевості з високою точністю. Agras T16 оснащено баком об'ємом 16 літрів, продуктивність 8 форсунок і 4 насосів складає 4,8 л/хв. За одну годину дрон здатен обробляти ділянку площею до 10 га. Восьми роторна схема гарантує найвищий рівень надійності. Навігаційна система забезпечує сантиметрову точність позиціонування. Ширококутна курсова камера здатна передавати HD-відео на відстань до 3 км.

2.Картографія - DJI Phantom 4 RTK



Дрон DJI Phantom 4 RTK застосовується для оперативного створення великомасштабних, точних ортофотопланів і 3D моделей місцевості. При дотриманні технологій геодезичного забезпечення ці продукти відповідають вимогам кадастрових зніманих в масштабі 1:500. Отримані дані необхідні для вимірювання реальних площ земельних ділянок і планування агротехнічних міроприємств. Також за створеними просторовими моделями місцевості складають карти-завдання для сільськогосподарської техніки – у тому числі безпілотної.

Дрон оснащено модулем супутникового позиціонування RTK геодезичного класу точності (містить приймач сигналів GPS L1 L2, GLONASS L1 L2, Galileo E1 E5a та BeiDou B1 B2). Точність позиціонування в горизонтальній площині: 1 см+1мм. Абсолютна точність фотограмметричної моделі в горизонтальній площині: 5 см.

Дрон може працювати з мобільною станцією D-RTK 2.

3.Мультиспектральне знімання – DJI P4 Multispectral



Дрон має вбудовану систему стабілізації зображень. Камера є агрегатом, зібраним в одному корпусі: одна RGB-камера та блок з 5 вузькоспектральних камер, що охоплюють синій, зелений, червоний, червоний край і ближній інфрачервоний діапазони – усі з роздільною здатністю 2 МП із спільним затвором на 3-осьовому стабілізованому підвісі.



Рис.1.3. Багатоспектральна камера квадрокоптера DJI P4 Multispectral

Об'єктив: кут огляду 62.7°, фокусна відстань 5.74 мм (40 мм – еквівалент формату 35 мм), діафрагма f/2.2. Матриці 1/2.9", 2.08 ефективних мегапікселів. Фільтри: синій (Blue, B): 450 нм ± 16 нм; зелений (Green, G): 560 нм ± 16 нм; червоний (Red, R): 650 нм ± 16 нм; червоний край (Red Edge, RE): 730 нм ± 16 нм; ближній інфрачервоний (Near-infrared, NIR): 840 нм ± 26 нм. Макс. розмір зображення 1600×1300 пікселів. Підбір каналів зроблено для вивчення вегетаційної активності, якості поливу і здоров'я рослин. Ці дані дозволяють будувати карти індексів NDVI, GNDVI, NDRE, LCI та OSAVI в програмі DJI Terra а також інші індексні карти в сторонньому програмному забезпеченні. Враховано всі потреби для підтримки прийняття рішення про обробіток полів, боротьби з шкідниками і бур'янами, стиглості врожаю на основі отриманої відео інформації.

Дрон оснащено системою точного супутникового позиціонування в реальному часі. Вбудований спектральний датчик сонячного освітлення у верхній частині дрону – він потрібен для регулювання світла, що потрапляє в камеру Програмне забезпечення дрона інтегроване з додатком DJI Ground Station Pro.

Окрім трьох БПЛА, в склад стандартного комплексу поставки входять програмні продукти і наземне обладнання, необхідні для повноцінного і успішного застосування комплексу.

Можливе дооснащення додатковими компонентами:

- Мобільна станція D-RTK 2 High Precision GNSS для роботи в мережі RTK і забезпечення точного супутникового позиціонування, в том числі в умовах сильних радіоперешкод;
- Зарядна станція для чотирьох акумуляторів DJI Agras T16;
- Ліцензоване програмне забезпечення DJI GS Pro (TeamProfessional) для управління польотами дронів;
- Ліцензоване програмне забезпечення DJI Terra Basic для картографування і фотограмметрії.

Як більш бюджетна альтернатива кожен із складових комплексу може замінюватись або оснащуватись альтернативними пристроями. Зокрема замість DJI P4 Multispectral може встановлюватись мультиспектральна камера на дрон DJI Phantom 4 RTK.

Існують також рішення додаткового оснащення RGB фотокамери фільтрами, які забезпечують отримання спектральних каналів для розрахунку індексних карт. Зокрема такі світлофільтри як «Синій **IR/NDVI Lens Filter**» від компанії **Kolari Vision** пропускає як синє світло, так і ІЧ-промені, що робить його придатним для програм аналізу індексів NDVI.

В таблиці 1.1. подаємо опис деяких фільтрів світла, які застосовуються при зніманні з БПЛА для вивчення рослинності.

Таблиця 1.1 Фільтри світла, які застосовуються при зніманні з БПЛА для вивчення рослинності

Назва фільтра	Призначення
RedEdge - червоний край (725 нм)	Фільтр RedEdge використовується для захоплення однієї смуги відбитого світла в області, відомій як червоний край. На довжині хвилі приблизно 700-800 нм рослини мають різну відбивальну здатність, яка тісно пов'язана з їхнім здоров'ям. Рослина, яка відбиває більше червоного світла, зазвичай буде більш здоровою.
Фільтр NGB (NIR + зелений + синій): Канал червоного зображення = світло NIR (ближнього інфрачервоного діапазону).	Фільтр враховує коефіцієнт зеленого відбиття рослини для визначення здоров'я рослини, а не просто використовує відбите ближнє

<p>Канал зеленого зображення = зелене світло</p> <p>Канал синього зображення = Синє світло</p>	<p>інфрачервоне світло (NIR), як індекс NDVI.</p>
<p>Фільтр RGN (червоний + зелений + NIR):</p> <p>Канал червоного зображення = червоне світло</p> <p>Канал зеленого зображення = зелене світло</p> <p>Канал блакитного зображення = світло NIR (ближнього інфрачервоного діапазону).</p>	<p>Фільтр RGN раніше був найбільш поширеною моделлю, яку купували найчастіше, головним чином завдяки його здатності вловлювати довжини хвиль червоного та NIR, необхідні для популярного індексу NDVI (додаткову інформацію див. нижче). NDVI, як правило, використовується як загальний індекс здоров'я та сили рослин.</p>
<p>Фільтр OCN (помаранчевий + блакитний + NIR):</p> <p>Червоний канал зображення = оранжеве світло</p> <p>Канал зеленого зображення = блакитне (синє/зелене) світло</p> <p>Канал блакитного зображення = світло NIR (ближнього інфрачервоного діапазону).</p>	<p>Фільтр OCN є вдосконаленням RGN, оскільки він забезпечує підвищений контраст серед рослинності та зменшує шум ґрунту. Краще використовувати OCN, якщо серед рослинності є ґрунт, і RGN, якщо культура має більш твердий полог (низька кількість пікселів ґрунту).</p>

Реалізація описаних фільтрів здійснена в фотоапаратах фірми MAPiR (<https://www.mapir.camera/en-gb/blogs/guide>). Ці апарати фіксують триканальні зображення, в яких канали з номерами 1,2,3 відповідно розфарбовуються кольорами палітри RGB – Red, Green, Blue як показано в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Фільтри світла, які застосовуються при формуванні знімків камерами фірми MAPIR

Пік спектру	Ширина спектру	фільтр	Канал
475 нм	15 нм	NGB	3
490 нм	36 нм	OCN	2
550 нм	15 нм	NGB, RGN	2
615 нм	42 нм	OCN	1
660 нм	15 нм	RGN	1
725 нм	23 нм	RE	1
808 нм	50 нм	OCN	3
850 нм	30 нм	NGB, RGN, NIR	1,3,1

Професійні рішення щодо мультиспектральної знімальної апаратури пропонується компанією Agrowing (США).

Використовуючи новітні цифрові камери Sony, Leica та інших виробників пропонується модифікація об'єктивів для отримання зображень із 5–15 вузькими смугами від 8 до 12 мегапікселів кожен і шириною смуг від 15 до 40 нм кожна. У більшості бортових мультиспектральних систем візуалізації використовується кілька ПЗЗ-камер, кожна з яких оснащена окремим смуговим фільтром. Перевага цього підходу полягає в тому, що кожен камеру можна індивідуально налаштувати для оптимального фокусування та параметрів діафрагми, але має недолік у тому, що зображення з усіх діапазонів мають бути належним чином синхронізовані.



61 Мп для відображення 12 мегапікселів на смугу

10 вузьких (30 нм на смугу) спектральних смуг або 9 + широкий RGB

Діапазони кольоровості: 405;430;450;550

560;570;650;685

710;850

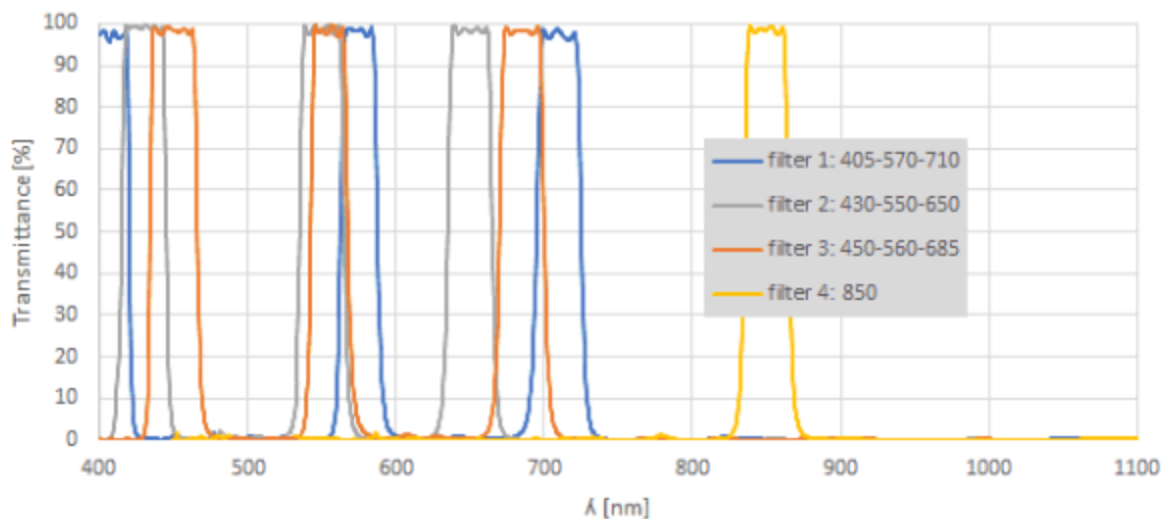


Рис.1.4. Модифікація компанії Agrowing цифрової фотокамери Sony ALFA 7Rv у багатоспектральну камеру Agrowing's Quad

З кількома оптичними системами дуже важко досягти такого вирівнювання оптично чи механічно, тому для вирівнювання зображень смуг зазвичай використовується процедура реєстрації на основі програмного забезпечення.

Кілька камер навряд чи можна синхронізувати для ідеальної відповідності отриманих зображень за допомогою швидко рухомих дронів. Проміжок у 20 мс може призвести до 20 см відстані для дрона, що летить зі швидкістю 10 м за секунду. Запатентована технологія Agrowing дозволяє використовувати 100% синхронізоване отримання зображень за допомогою однієї камери з одним датчиком і одним затвором.

1.3.Картографічний моніторинг полів за матеріалами аерознімань.

1.3.1.Картографування полів.

Серед програмного забезпечення та додатків, які зазвичай використовуються для планування польотів і керування безпілотними літальними апаратами для аерофотокартографування, є Litchi (компанія Vc Technology Ltd.), Pix4D capture (Pix4D), DroneDeploy (DroneDeploy) і DJI GS PRO (SZ DJI Technology Co.).

Для фотограмметричного опрацювання широко застосовуються спеціалізовані пакети програм, такі як Pix4D Mapping (Pix4D), Trimble Inpho Photogrammetry / UASMaster (Trimble), OpenDroneMap (ODM) та інші. З програм цього класу інтерес представляють OpenDroneMap (ODM) та Pix4D Field, які мають інструменти для опрацювання і знімків, отриманих камерами RGB та багатоспектральними камерами.

OpenDroneMap (скорочена назва ODM) — набір інструментів командного рядка для створення карт, хмар точок, 3D-моделей і DEM із зображень дронів (Сторінка OpenDroneMap/ODM представлена на інтернет-сервісі GitHub. <https://github.com/OpenDroneMap/ODM>) [14, 22].

Технологічна схема опрацювання знімків в цій програмі

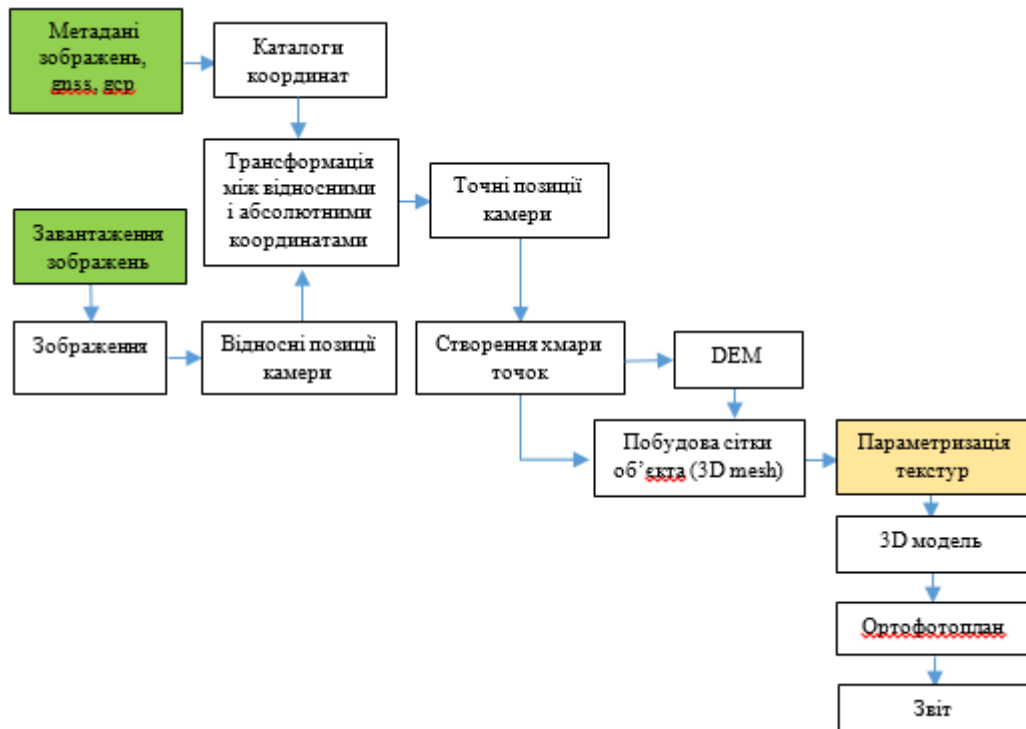


Рис.1.5. Технологічна схема опрацювання знімків в програмі ODM

Програмне забезпечення ODM на вхід отримує дані двох типів:

- метадані знімків, каталоги координат центрів проєкцій (якщо вони були визначені під час знімання бортовою апаратурою GNSS) та опорних наземних точок GCP;
- файли зображень.

Після опрацювання в автоматичному режимі програма будує щільну хмару точок і полігональну сітку поверхні об'єкта (3d mesh), карти висот та ортофотоплан.

1.3.2. Принципи створення картографічних моделей рослинності

Картографування агроценозів для потреб дослідження рослинності в рільництві, садівництві, лісовому господарстві відбувається шляхом створення моделей які відображають ознаки спектральної відбивної здатності рослинності.

Фізично зміна стану рослинності проявляється у зміні її здатності поглинати та відбивати електромагнітне випромінювання різних довжин хвиль.

Спектральна відбивна здатність рослинності різних порід, віку, стадії вегетації характеризується значними відмінностями. Знання про зв'язок структури і стану рослинності з її спектрально відбивними властивостями дозволяють використовувати знімки для ідентифікації і картографування типів рослинності та їхнього стану. Сучасні прийоми опрацювання спектральної інформації є результатом міждисциплінарної співпраці між геодезистами, геоінформатиками, фахівцями комп'ютерних наук та біологами.

Мультиспектральні та гіперспектральні камери фіксують видимі, ближні інфрачервоні та короткохвильові інфрачервоні сегменти електромагнітного спектру, відбитого від поверхні рослин світла. Інтенсивність відбиття залежить від виду рослини та від її стану (рис. 1.6) [20].

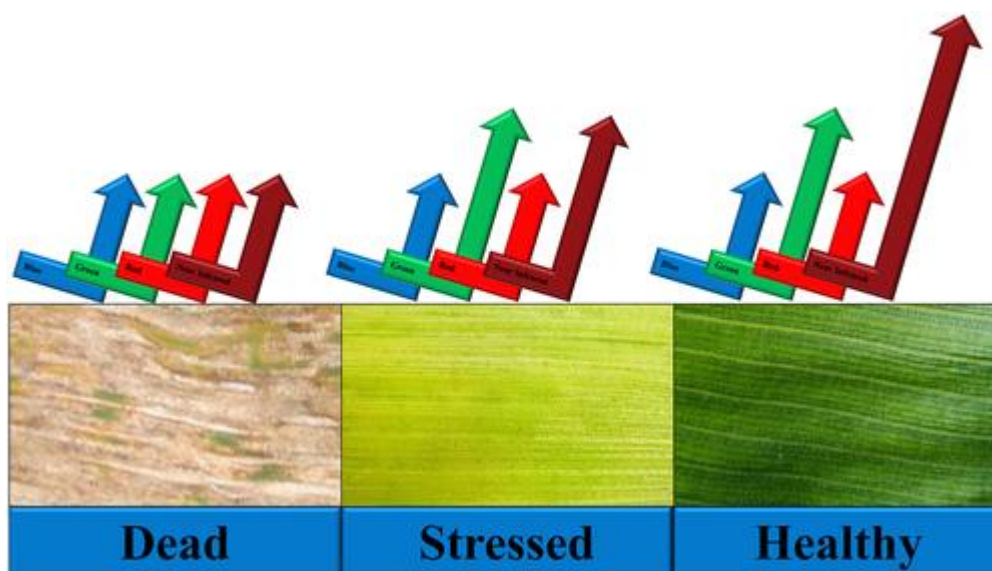


Рис.1.6. Унікальні відмінності оптичного відбиття синього, зеленого, червоного та ближнього інфрачервоного світла, випромінюваного від мертвої, стресової та здорової рослинної тканини

Як показано на рисунку 1.6. індикатором стану рослинності в першу чергу є кількість енергії, яку вона здатна відбивати в ближній інфрачервоній зоні спектру довжин хвиль та поглинати енергію в зеленій та червоній зонах. Ці

ділянки є найбільш стабільними частинами графіка спектральної відбивної здатності рослин, рисунок 1.7.

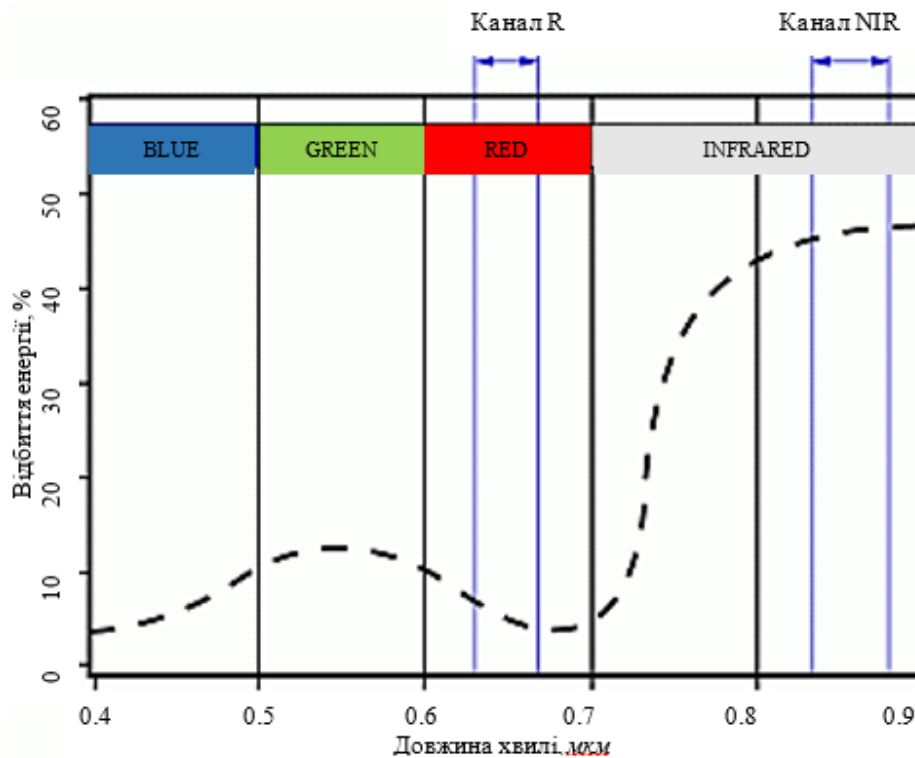


Рисунок 1.7. Характер відбиття рослинами сонячного світла

На рис.1. . показано «Канал R» та «Канал NIR» як реалізації в конкретних камерах, що можуть не охоплювати всі відповідні зони спектра «RED» та «INFRARED». При застосуванні гіперспектральних знімальних систем можуть бути присутні декілька вузьких каналів для кожної із спектральних зон [16]

На червону зону спектра RED (хвилі довжиною 0,62 – 0,75 мкм) припадає максимум поглинання сонячного випромінювання хлорофілом, а на ближню інфрачервону зону NIR (0,75–1,3 мкм) доводиться максимальне відбиття енергії, тобто це свідчить про високу фотосинтетичну активність і отже опосередковано – про велику фітомасу рослинності. Велика кількість хлорофілу в клітинній структурі листя веде до більш низьких значень коефіцієнтів відбиття в червоній зоні спектра і більших значень у ближній інфрачервоній. Як це добре відомо, відношення цих показників один до одного дозволяє чітко виділити на знімку рослинність від інших природних та штучних об'єктів.

Іншим поширеним підходом є виявлення змін коефіцієнта відбиття на межі червоного/ближнього інфрачервоного діапазону. Ця позиція спектру має власну назву «червоного краю» і є вузькою ділянкою в електромагнітному спектрі (690–740 нм), де закінчується видимий спектр світла і починається ближній інфрачервоний (рис. 1.8).

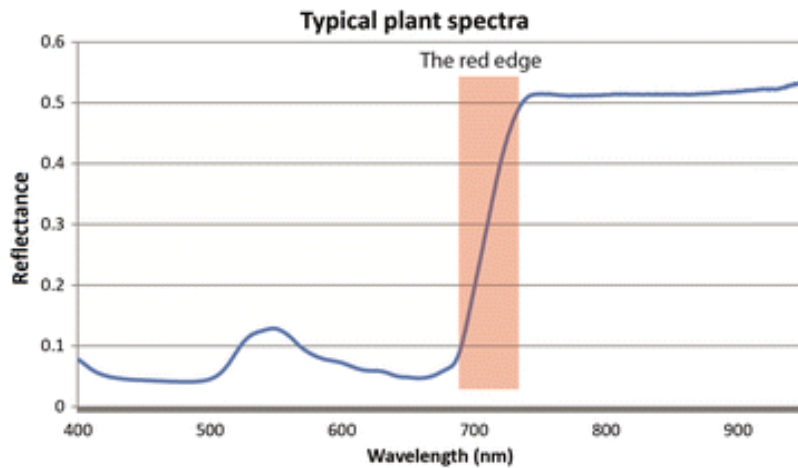


Рис.1.8. Типовий спектр здорової рослинності (400–1000 нм) з червоним краєм, виділеним червоним (690–740 нм)

Цей розділ має значну зміну спектрального відгуку (похідної) для зеленого рослинного матеріалу, оскільки хлорофіл сильно поглинає хвилі з довжиною хвилі приблизно до 700 нм, і, отже, матеріал має низький коефіцієнт відбиття в цьому діапазоні, але він сильно відображає інфрачервоне випромінювання (приблизно від 720 нм).

Описані вище теоретичні викладки дозволяють формувати картографічні моделі як зони однорідних показників параметрів відбиття або лінії різкої зміни таких параметрів що може свідчити про властивості існуючої на знімку рослинності.

2.Методика моніторингу культурної рослинності за аерознімками.

2.1.Моніторинг сільськогосподарських угідь з допомогою БПЛА.

Засоби дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема знімальні системи які розміщені на БПЛА надають цінну інформацію для аналізу стану посівів та умов росту рослин. Аерознімання з БПЛА застосовуються для проведення моніторингу сільськогосподарських земель на протязі всього періоду агровиробничого циклу, починаючи від етапу планування, передпосівної підготовки ґрунту і закінчуючи збором врожаю та оцінки параметрів продуктивності поля.

Обставини, в яких відбувається діяльність на полях аграрного підприємства внаслідок погодних умов, якості посівного (садивного) матеріалу, якості добрив та засобів захисту рослин, помилок в технологічному процесі їх внесення можуть негативно проявитись у будь-який момент і створити загрозу отриманню запланованого врожаю. Оперативний моніторинг поля – це процес періодичного (в деяких випадках - постійного) спостереження за тим, як змінюється ситуація на контрольованій ділянці. Застосування в такому моніторингу БПЛА дозволяє вчасно виявити проблеми і допомогти прийняти рішення щодо способу їх виправлення.

В ході здійснення моніторингу періодично контролюються чинники, що впливають на врожайність у різних фазах росту рослин та на етапах здійснення агротехнічних міроприємств. Відхилення від норми на різних етапах розвитку рослин, наприклад через перепади температури, наднормові опади або порушення технології вирощування можуть бути документально зафіксовані на аерознімках.

За допомогою аеро-візуального обстеження або аерознімання з БПЛА перед посівом проводиться аналіз стану ґрунту та перевіряється якість проведення передпосівного обробітку ґрунту.

Після посіву (дедалі частіше для цього застосовують літальні і наземні безпілотні апарати) БПЛА застосовуються для контролю схожості врожаю. На цьому етапі аналізується рівень втрат рослин, визначається потреба в підсіві чи пересіві сільськогосподарських культур. При цьому саме використання БПЛА дозволяє найбільш швидко виявляти проблеми та оперативно на них реагувати. На основі інформації, яку дають БПЛА складаються карти густоти посівів та зон неоднорідності проростання, за допомогою яких можна проводити порівняльну характеристику стану всіх полів, вести підрахунок загальних втрат при проведенні посівних робіт, проводити аналіз потреби в підживленні та оптимізувати внесення добрив.

Використовуючи БПЛА, можна визначати ті ділянки з сільськогосподарськими культурами, де є необхідність вносити добрива у підживлення, а також створювати карти для плану диференціального внесення добрив.

Ці дані є підставою для складання електронних карт-завдань для автоматизованих та роботизованих систем обробітку ґрунту, сівалок та оприскувачів.

Різні стадії розвитку сільськогосподарських культур (фенологічні фази) мають певні особливості, які можуть суттєво вплинути на доцільність і методику виконання аеромоніторингу. Дослідження фенологічних фаз в контексті точного землеробства промислового масштабу відбувається з використанням класифікації етапів розвитку рослин за системою ВВСН (за даними сайту компанії EOS Data Analytics).

В основі класифікації за системою ВВСН лежить шкала Задокса, яка свого часу була розроблена для відслідковування росту зернових культур, а пізніше поширена на інші культури [18]. Відповідно до методики ВВСН виділяють 10 основних етапів росту рослин (за матеріалами сайту EOS <https://eos.com/uk/blog/etapy-rozvytku-roslyn/#>):

1. проростання;
2. розвиток листя;

3. куцїння;
4. подовження стебла;
5. розвиток вегетативних органїв рослин;
6. поява суцвїть;
7. цвїтїння;
8. утворення плодїв;
9. дозрївання плодїв;
10. вїдмирання.

Програма монїторингу розвитку рослин складається з врахуванням тривалостї етапїв росту для конкретних культур з врахуванням клїматичних умов та технологїй їхнього вирощування. Водночас стандартна шкала ВВСН пїдходить для будь-яких культур, для яких не їснує окремої класифїкацїї. Вїдповїдно проектується аерознїмання їз застосуванням того чи їншого типу знїмальної апаратури, масштабу аерознїмкїв, перїоду повторюваностї монїторингових та контрольних польотїв.

Також можливостї БПЛА застосовуються для боротьби зї шкїдниками полїв, хворобами та бур'янами, при цьому на частку бур'янїв припадає приблизно 30% втрат врожаю. Досить часто сумарнї втрати врожаю та додатковї витрати на очищення полїв вїд бур'янїв подвоюють загальнї втрати у виробництвї численних сїльськогосподарських культур, зокрема, зерна.

Завдяки низькїй висотї польоту ї камерам з високим розрїзненням дрони здатнї збирати вїдеоїнформацїю, за допомогою якої можна вїдрїзняти бур'яни вїд посївїв, з отримувати бїльш точну їнформацїю щодо виду ї просторового осередку бур'янїв та вчасно вносити оптимальну дозу гербїциду. Використання БПЛА суттєво мїнїмізує кїлькїсть ї об'єми засобїв захисту рослин та водних ресурсїв за рахунок точкової обробки лише необхідних дїлянок.

Регулярнї їнспекцїйнї польоти скорочують ризики розкрадання врожаю, потрави тваринами, неправильного складування та їнше. Це гарантує безперебїйну роботу бїзнесу, постїйний контроль територїй, своєчасне усунення їнцидентїв та пїдвищує кїлькїсть реалїзованої продукцїї [2].

2.2.Методика створення індексних карт за аерознімками, отриманими цифровими RGB та NDVI фотокамерами.

Стандартизовані протоколи обробки та аналізу відеоданих БПЛА для збору просторово-часових фенотипних даних про морфологічні ознаки рослин, передбачають застосування таких геометричних показників [17]:

- висота крони (CH);
- проекційне покриття крони (CC);
- об'єм пологугу (CV).

При опрацюванні спектральної відеоінформації часто вдаються до створення так званих «індексних» зображень. На основі комбінації значень яскравості в окремих каналах, які є інформативними для виділення певних властивостей відбивної здатності об'єкта що досліджується, і арифметичного розрахунку за цими значеннями в кожному пікселі «спектрального індексу» об'єкта будується синтетичне зображення. Це робиться з метою виділити досліджуванний об'єкт або оцінити його стан.

Спектральні індекси, що використовуються для вивчення та оцінки стану рослинності, отримали загальноприйняту назву вегетаційних індексів. За визначенням ДСТУ 4758:2007 [5] індекс - умовний кількісний показник, який обчислюють за допомогою математичних операцій над значеннями яскравостей пікселів зображення, а індексне зображення – це цифрове зображення, значення кожного піксела в якому визначають на основі індексів.

Індекс розраховують із застосуванням значень пікселів як широкосмугових так і вузьких каналів RED, GREEN, BLUE, NIR. Деякі з цих індексів, які знайшли застосування для опрацювання аерознімків з БПЛА розглянемо далі в цьому огляді.

Таблиця 2.1. Вегетаційні індекси та інформація про їхнє застосування

Вегетаційний індекс	Формула	Інформація
Нормований індекс різниці рослинності (NDVI)	$(RNIR - RRED)/(RNIR + RRED)$ RRED ~ 680, RNIR ~ 800	Діапазон: - 1 до 1 Загальний діапазон: 0,2–0,8 Широкосмуговий доступ
Червоний край NDVI	$(R750 - R705)/(R750 + R705)$	Діапазон: - 1 до 1 Типовий здоровий діапазон: від 0,2 до 0,9 Вузькосмуговий (гіперспектральні дані)
Індекс простого співвідношення (SRI)	RNIR/RRED RRED ~ 680, RNIR ~ 800	Діапазон: від 0 до > 30 Типовий здоровий діапазон: ~ 2–8 Широкосмуговий доступ
Індекс фотохімічного відбиття (PRI)	$(R531 - R570)/(R531 + R570)$	Діапазон: - 1 до 1 Типовий здоровий діапазон: - 0,2 до 0,2 З PRI є індикатором доров'я рослинності до старіння
Індекс відбиття старіння рослин (PSRI)	(Червоний–зелений)/NIR	Діапазон: - 1 до 1 Типовий здоровий діапазон: - 0,1 до 0,2 PSRI вказує на стрес рослинного покриву, початок старіння, дозрівання плодів

Вегетаційний індекс	Формула	Інформація
Нормалізований індекс феофітинізації (NPQI)	$(R415 - R435)/(R415 + R435)$	Деградація хлорофілу 0,56–1,41 Непідкислені та підкислені розчини
Структурно незалежний індекс пігменту (SIPi)	$(R800 - R445)/(R800 + R680)$	Діапазон: 0–2 Типовий діапазон для здорової рослини: 0,8–1,8
Індекс тяжкості хвороби листової іржі (LRDSI)	$6,9 \times (R605/R455) - 1,2$	Точність 89% у дослідженні може відрізнитися залежно від інших даних.

Після того, як зображення зроблені камерами моделей OCN, RGN, NGB, RE та NIR, їх калібрують за допомогою спеціальних тест-мішеней для калібрування, як наприклад тест і програмне забезпечення компанії MAPiR [<https://www.mapir.camera/collections/calibration-targets>]. Після калібрування зображення піддаються фотограмметричному опрацюванню в середовищі однієї з таких спеціалізованих програм як наприклад Pix4D, Agisoft, Drone Deploy, Agribotix, MapsMadeEasy, Simactive, Icaros тощо. Багато з цих програм пропонують так званий калькулятор растру, який обчислює пікселі зображення або інструменти для прямого обчислення вегетаційних індексів.

Наприклад числові значення яскравості пікселів, отримані фотокамерою з фільтром RGN для обчислення індексу NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} = \frac{Y - X}{Y + X} \quad (2.1)$$

Як можна бачити у формулі вище, індекс NDVI використовує ближнє інфрачервоне та червоне світло. Отже, для моделей камер із фільтром RGN це буде третій (фарбується у синій колір) канал зображення (NIR) і перший (червоний) канал зображення (RED). Програма обробки візьме значення пікселів у червоному та синьому каналах зображення та підключить його до наведеного вище рівняння. Усі отримані пікселі матимуть значення в діапазоні від -1 до +1. Для рослин значення NDVI реальних рослин коливаються приблизно від 0,2 до 0,8. Потім ми застосовуємо колірну шкалу до пікселів, щоб краще інтерпретувати дані. В шкалі як правило використовують кольори від зеленого до жовтого та червоного (від високого до низького рівня індексу).

Важлива згадка про калібрування відбиття за допомогою наших наземних цілей :

Згадані вище значення пікселів, які вказують на те, чи дивитеся ви на здорові рослини чи, скажімо, на бруд поблизу, на які впливає процедура калібрування. Без калібрування зображень отримані значення найчастіше будуть негативними, в основному сміттєвими значеннями. Отримане кольорове світлове зображення, яке часто називають «красивим зображенням», може відображати схожу зелену, жовту та червону карту, але без калібрування ви не зможете порівняти результати від одного розташування поля до іншого, від одного зовнішнього освітлення до іншого, або по суті один момент часу до іншого (тиждень за тижнем, місяць за місяцем тощо). Без калібрування ви не вирівняєте піксельні дані за відомим стандартом, тому значення не можна буде порівняти.

3. Моніторингові дослідження рослинності за матеріалами аерознімання з БПЛА.

3.1. Фотограмметричне опрацювання матеріалів аерознімання угідь фермерського господарства.

Вхідними даними експериментальної роботи є матеріали аерознімання земельних угідь що надаються консорціумом OpenDroneMap Community. sUAS Photogrammetry Suite Test Data.

[https://github.com/Carlocktography/sUAS Photogrammetry Suite Test Data](https://github.com/Carlocktography/sUAS_Photogrammetry_Suite_Test_Data) як зразковий набір для тестування алгоритмів та комп'ютерних програм цифрової фотограмметрії sUAS. Дані доступні дослідникам для використання під ліцензією, якою не передбачаються будь-які умови для передачі твору у суспільне надбання. Неліцензійні роботи, модифікації та більші роботи можуть поширюватися на довільних умовах і без вихідного коду. Дозволи надаються для приватного і комерційного використання. Жодних відповідальності і гарантій не надаються.

Тестове аерознімання виконувалось в літній період квадрокоптером моделі 3DR Solo виробництва компанії 3DRobotics, оснащеним цифровою фотокамерою GoPro Hero4 Black (рис.3.1).

Основне призначення дрона 3DR Solo - професійне, високо інтелектуальне фото і відео знімання. Сам БПЛА і пульт керування працюють під управлінням операційної системи Linux. Для монтажу фотокамери застосовується 3-осьовий гіростабілізований підвіс, пристосований для камер GoPro.



Рис.3.1. Квадрокоптер 3DR Solo та камера GoPro Hero4 Black

Технічні характеристики:

- Вага: 88 грами без боксу, 152 грама в боксі
- Підтримка карт пам'яті: microSDHC < / span>
- Розмір матриці: 12 Мпікс
- Фокусна відстань: від 0,5 м до нескінченності
- Акумулятор: 1160 мАг (90 хвилин автономності)
- Порти: mini USB, Мікро HDMI
- Максимальна роздільна здатність відео: 4K (3840 x 2160)
- Формат відеофайлів: H.264 codec, .mp4
- Розмір: 4.2 x 5.9 x 2.9 см

В тестовому блоці аерознімків загальна кількість аеронімків: 87. Аерознімання виконувалось за класичною схемою площинного знімання з перекриттям знімків 80%. Графічне зображення траєкторії польоту показано на рисунку 3.2.

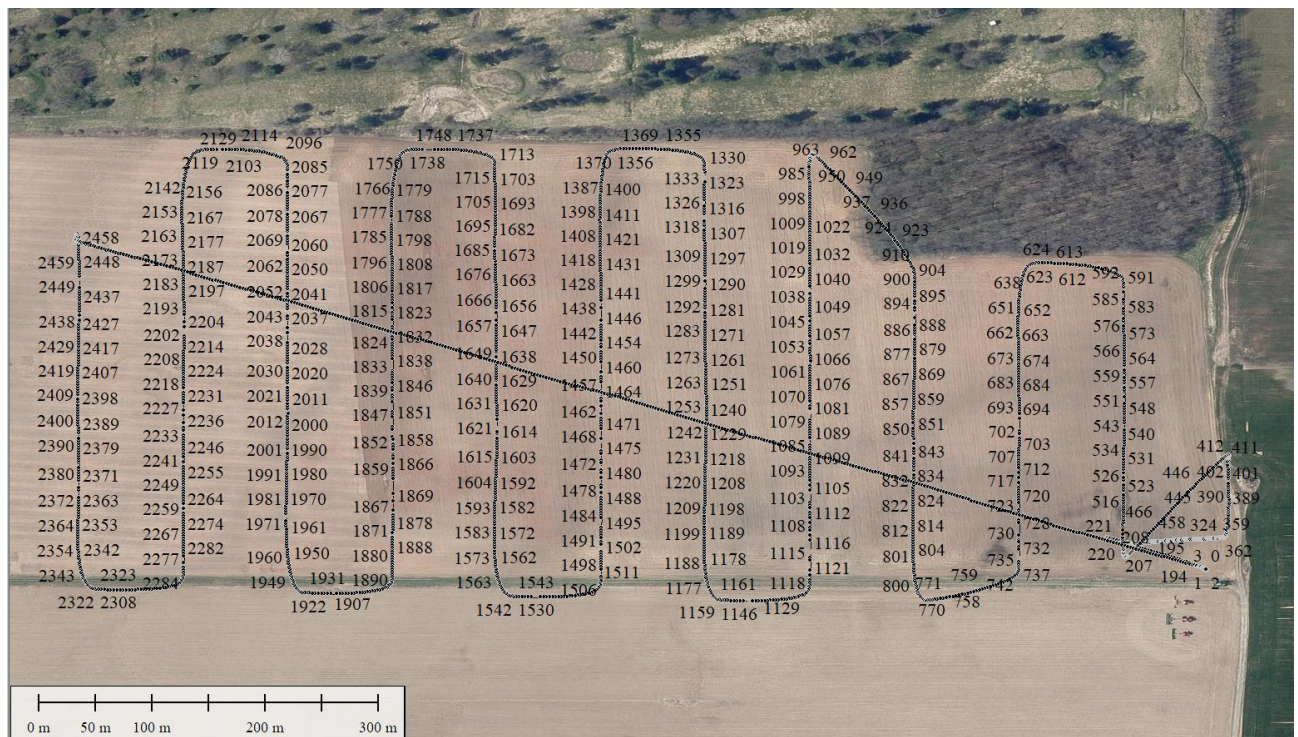


Рис.3.2. Траєкторія польоту при аерозніманні тестової ділянки

Центри проєкцій знімків фіксувались навігаційним GPS приймачем із записом в EXIF-файли зображень. Точність визначення координат центрів проєкцій (середні квадратичні помилки визначення просторових координат СКП) складає:

$$\begin{aligned}СКП_x &= 2.495882\text{ м}; \\СКП_y &= 8.567202\text{ м}; \\СКП_z &= 4.299167\text{ м}.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Загальний розмір файлів: 243 МБ. Розмір окремого зображення: 12 МП, 4000x3000 пікселів. Формат зображення: ProTune JPEG.

Датчик зображення: GoPro Hero4 Black, Повний спектральний. Об'єктив фотокамери оснащено оптичним фільтром типу Blue/NIR NDVI Filter виробництва компанії KolariVision (США). Характеристики пропонованих компанією оптичних фільтрів показано на рисунку 3.3.

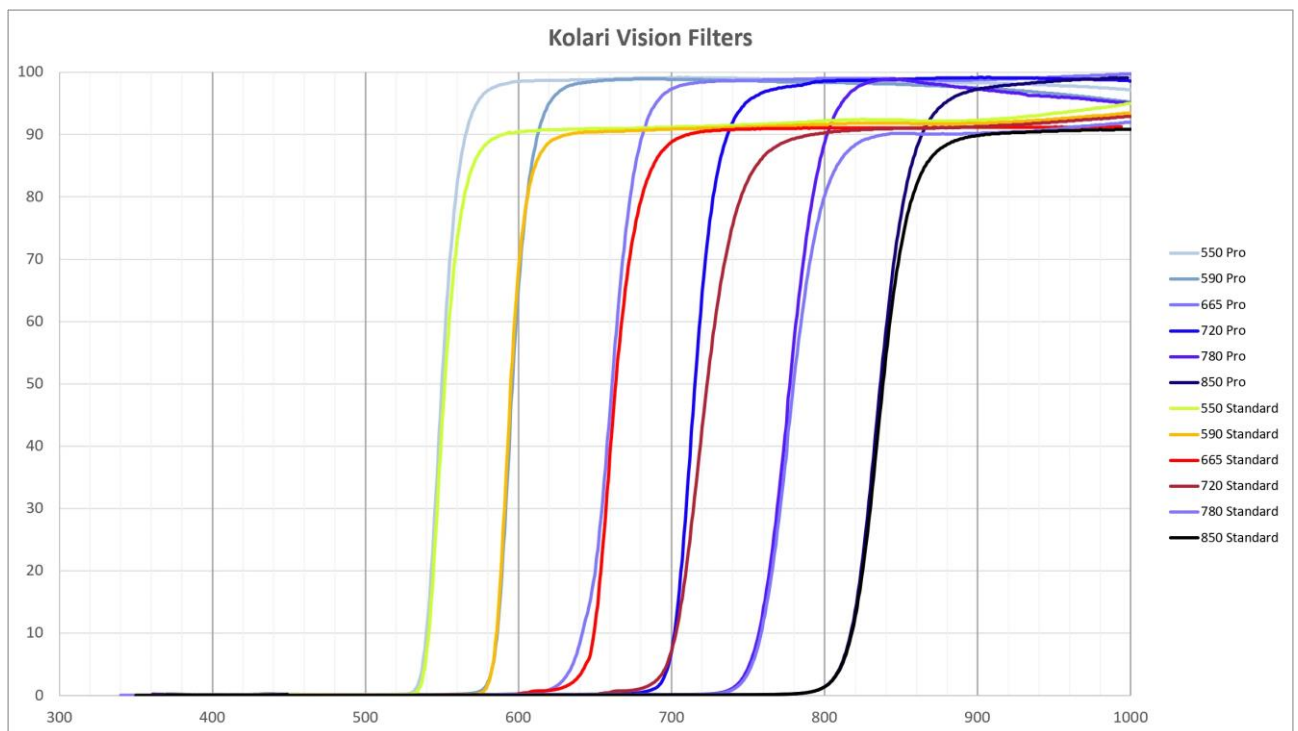


Рис.3.3. Характеристики пропонованих компанією KolariVision оптичних фільтрів

Вони охоплюють шість вузьких смуг ближньої інфрачервоної зони спектру з довжинами хвиль від 550 нм до 1000 нм і випускаються у двох варіантах кожен – з 90% та 100% пропускнуою здатністю оптичного скла. Камера фіксує 3-канальне зображення, в якій в записах каналів розміщуються рівні яскравості таких частин спектру:

- Band 1 – RED – високий коефіцієнт відбивання ІЧ-променів. Фактично $NIR = R$. Близькі інфрачервоні промені довжиною хвиль від 700-800 нм відображатимуться в першу чергу на перший канал.
- Band 2 – GREEN – низький коефіцієнт відбиття ІЧ-променів, переважно наземні/невегетативні віддачі.
- Band 3 – BLUE – середній коефіцієнт відбиття ІЧ-променів, хороші наземні/невегетативні відбитки. Синє світло відображатиметься на синьому каналі.
- Світло з діапазону 850-1000 нм (це права частина ділянки NIR) буде зіставлятися з червоним, синім і зеленим, але у вас набагато менша чутливість в діапазоні 850-1000нм, ніж в діапазоні 700-800нм, тому це меншість сигналу.

Зафарбовування пікселів значеннями NIR у відтінках червоного робить зображення у неприродних кольорах (рис.3.4).

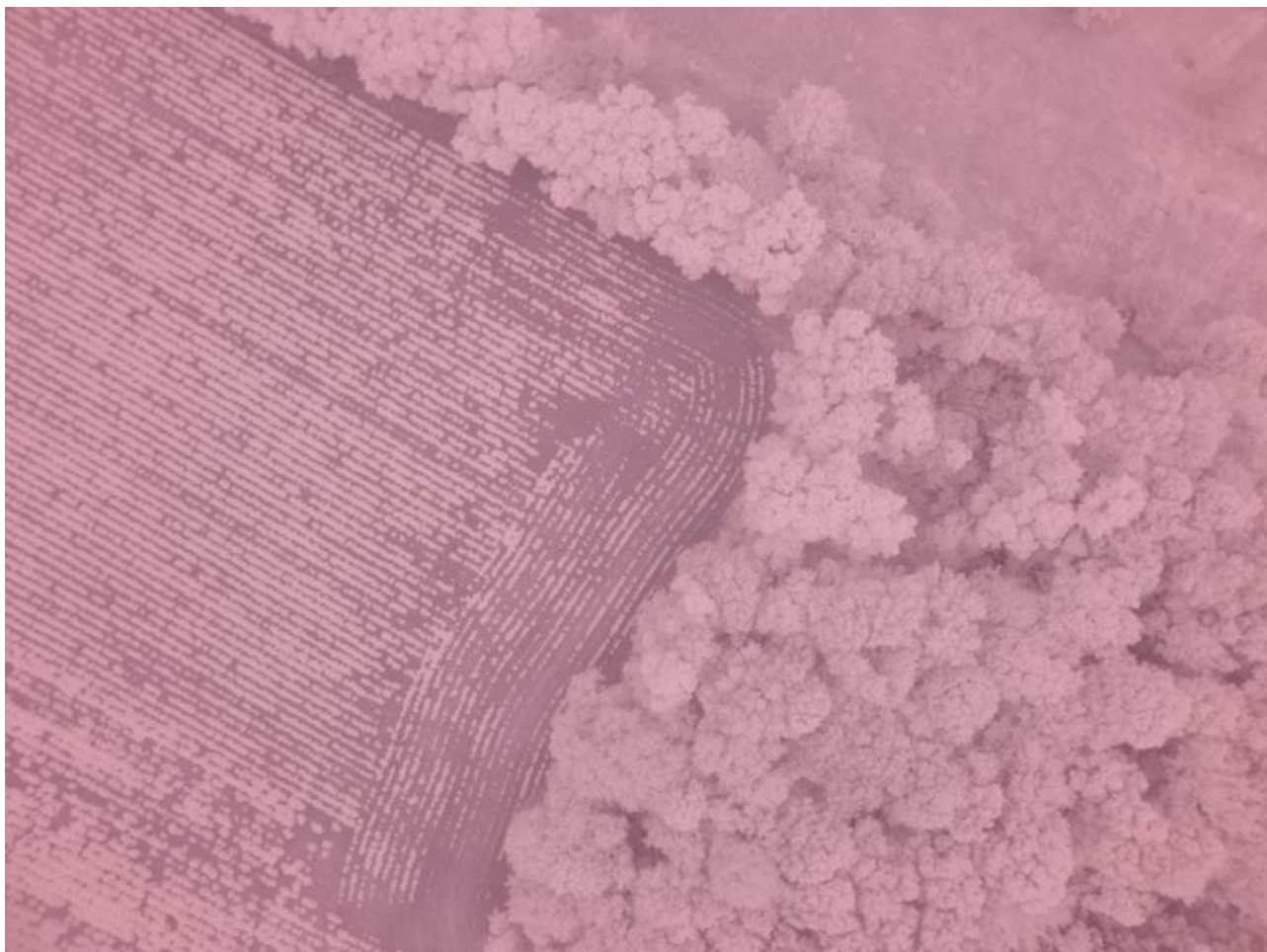


Рис.3.4. Приклад аерознімка, отриманого з БПЛА цифровою фотокамерою GoPro Hero4 Black із застосуванням оптичного фільтра Blue/NIR NDVI

3.2. Робочий процес фотограмметричного опрацювання знімків в програмі OpenDroneMap

Робочий процес опрацювання аерознімків в програмному пакеті ODM поділяється на декілька етапів [25].

- 1.Завантаження наборів даних.
2. Structure from Motion (SfM): Стереореко́нструкція, пошук зв'язкових точок в зонах взаємного перекриття знімків.
- 3.Multi View Stereo. Щільна стереореко́нструкція.
- 4.Meshing. Створення полігональної моделі поверхні.

5.Текстурування.

6.Georeferencing. Ортотрансформування окремих знімків.

7.DEM. Створення цифрової моделі рельєфу.

8.Створення мозаїки ортофотоплану

В кінці 2022 року вийшло оновлення ODM 3.0, де суттєво покращено якість отримуваних моделей, видалено деякі застарілі параметри. Програмне забезпечення ODM доступне як самостійний додаток або сервіс WebODM. [13, 21, 24]

Завантажувати файли в інтерфейс проекту можна перетягуванням. Після завантаження файлів буде ініційована обробка зображень. Проект з 87 зображень оброблявся приблизно 2 години. Після того, як ми матимемо статус "виконано", оглянемо нашу 3d модель.

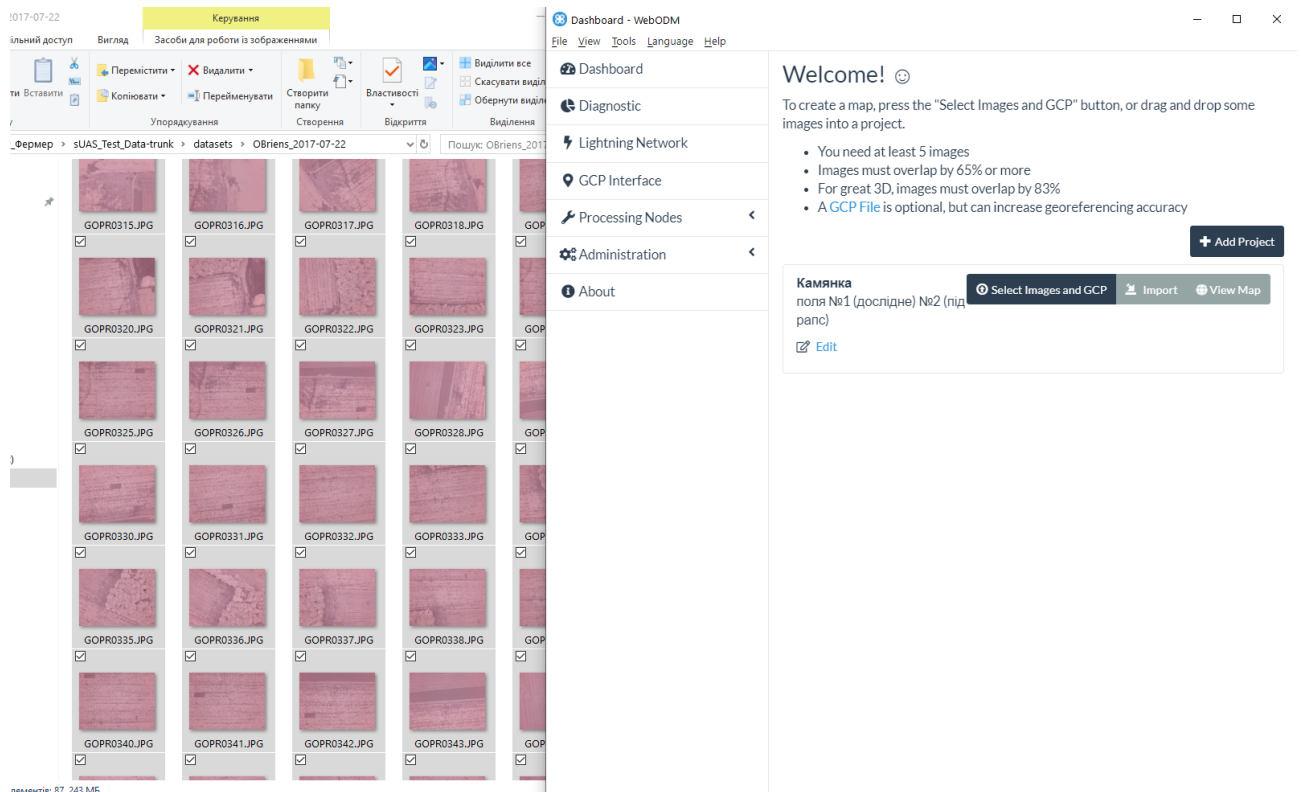


Рис.3.5. Інтерфейс проекту в WebODM

Ознайомимося з основними налаштуваннями, які необхідні для роботи з WebODM. Для цього натиснемо на кнопку "Редагувати" поряд з опціями:

- `max-concurrency` – максимальна кількість потоків для використання в різних процесах. У середньому один потік виділяється 1 Гб оперативної пам'яті комп'ютера з урахуванням розміру зображень в 2 Мб. Цей параметр можна зменшити, якщо у вас не вистачає оперативної пам'яті;
- `ignore-gsd – true`;
- `orthophoto-resolution` - Зменшення цього значення збільшує чіткість зображення;
- `feature-quality` – Загальний параметр якості 3D реконструкції. Параметр `high` дозволяє отримати оптимальну якість;
- `ps-quality` - встановлює якість хмари точок. Більш висока якість створює більш щільні хмари точок, але значно збільшує майже в 4 рази більше оброблятися і потребує більше ресурсів;
- `mesh-size` – максимальна кількість вершин. Збільшення цього параметра до 300000-600000 може значно покращити якість 3d моделей у міських умовах;
- `mesh-octree-depth` – збільшення глибини сітки для знаходження більшої кількості вершин. Параметри більш ніж 11 значно покращують реконструкцію складних моделей.
- `ps-tile` - зменшує кількість використаної оперативної пам'яті шляхом розбиття великих сцен на плитки.

З аерофотознімків створюється розріджена хмара точок, що пов'язують усі зображення разом. Потім вона перетворюється на щільну тривимірну хмару точок. Це дозволяє виконати реконструкцію поверхні, яку можна нанести текстуру. Поверхня із текстурою використовується для побудови ортофотомозаїки.

Для першого кроку у процесі ODM використовує відкрите програмне забезпечення від Mapillary. Програмне забезпечення зіставляє кілька знімків

одного і того ж простору під різними кутами, створюючи 3D-інформацію з 2D-зображень, в результаті чого виходить розріджена хмара точок.

Наступний крок – створення на його основі візуально зрозумілого 3D-простору, де можна розрізнити різні об'єкти та поверхні.



Рис.3.6. Створена модель поверхні рельєфу поля з горизонталями, проведеними через 0,25м

Перетворена хмара точок дозволяє створити поверхню, яку можна нанести текстуру через реконструкцію Пуассона. Цей метод доступний у бібліотеці Point Cloud – великому відкритому проєкті з обробки 2D- та 3D-зображень. 3D-поверхня текстурується шляхом накладання зображень з використанням алгоритмів, що визначають, яке зображення найкраще підходить для тієї чи іншої області. Після цього кроку створюється кінцевий ортофотоплан.

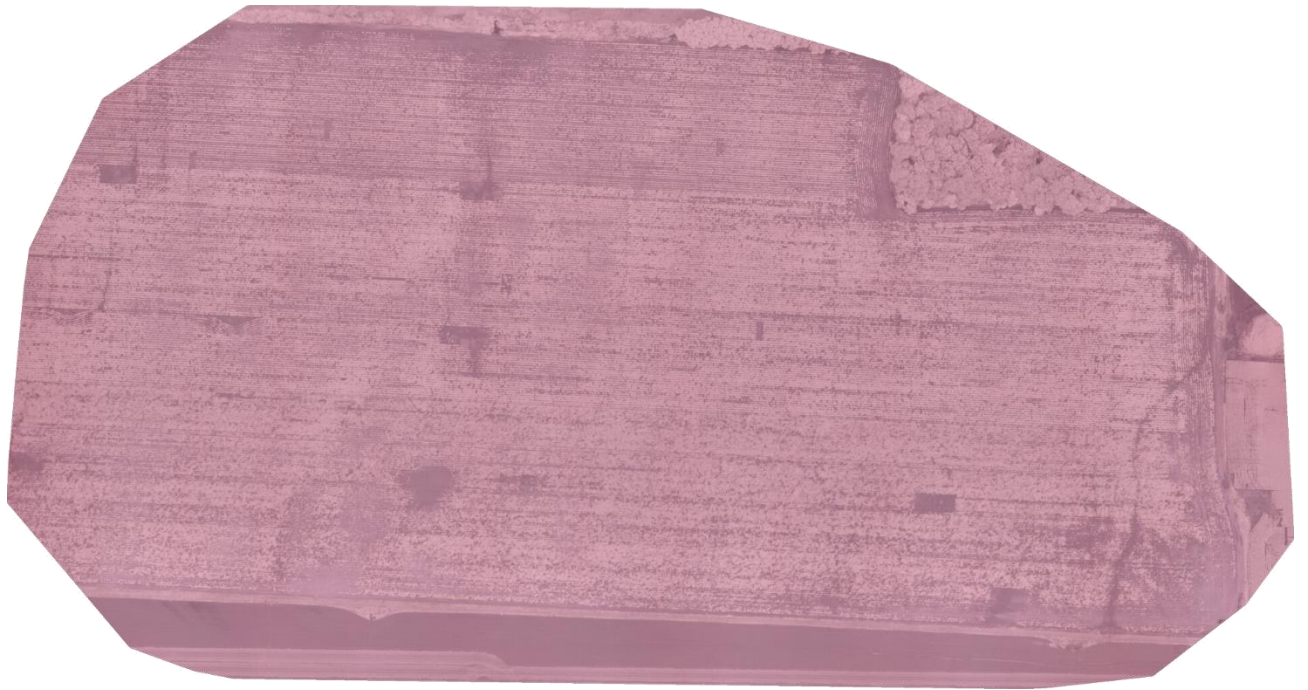


Рис.3.7. Кінцевий ортофотоплан

Таким чином для вирішення завдання фотограмметричного опрацювання аерознімків поля нами встановлено, що WEBODM - це просте у використанні, безкоштовне програмне забезпечення для створення ортопланів та 3d моделей, яке може бути цілком конкурентноздатним пропріетарному програмному забезпеченню.

Побудувати індексну карту NDVI можна в будь-якому програмному забезпеченні ГІС. Ми скористались геоінформаційною системою ArcMAP, яка має зручний калькулятор растрів для виконання попівсельних арифметичних дій з растрами.

Спочатку в програмі ArcCatalog відокремимо і запишемо в окремі одноканальні растри складові ортофотоплану, який є трьохканальним зображенням NIR, GREEN, BLUE:

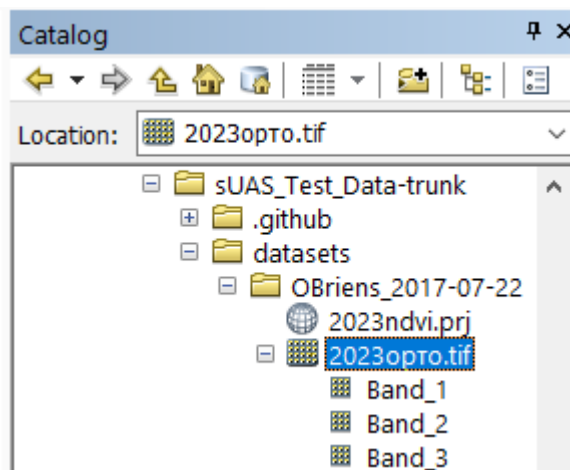


Рис.3.8. Розділення каналів ортофооплану в програмі ArcCatalog.

Можна просто перетягнути назви каналів з панелі ArcCatalog на панель змісту. Кожен з двох каналів є растром у відтінках сірого із значеннями яскравостей пікселів від 0 до 255.

Далі числові значення яскравостей пікселів каналів 1 та 2 використаємо в формулі розрахунку вегетаційного індекса NDVI. Skorистаємось калькулятором растрів, в який впишемо формулу для попіксельного розрахунку.

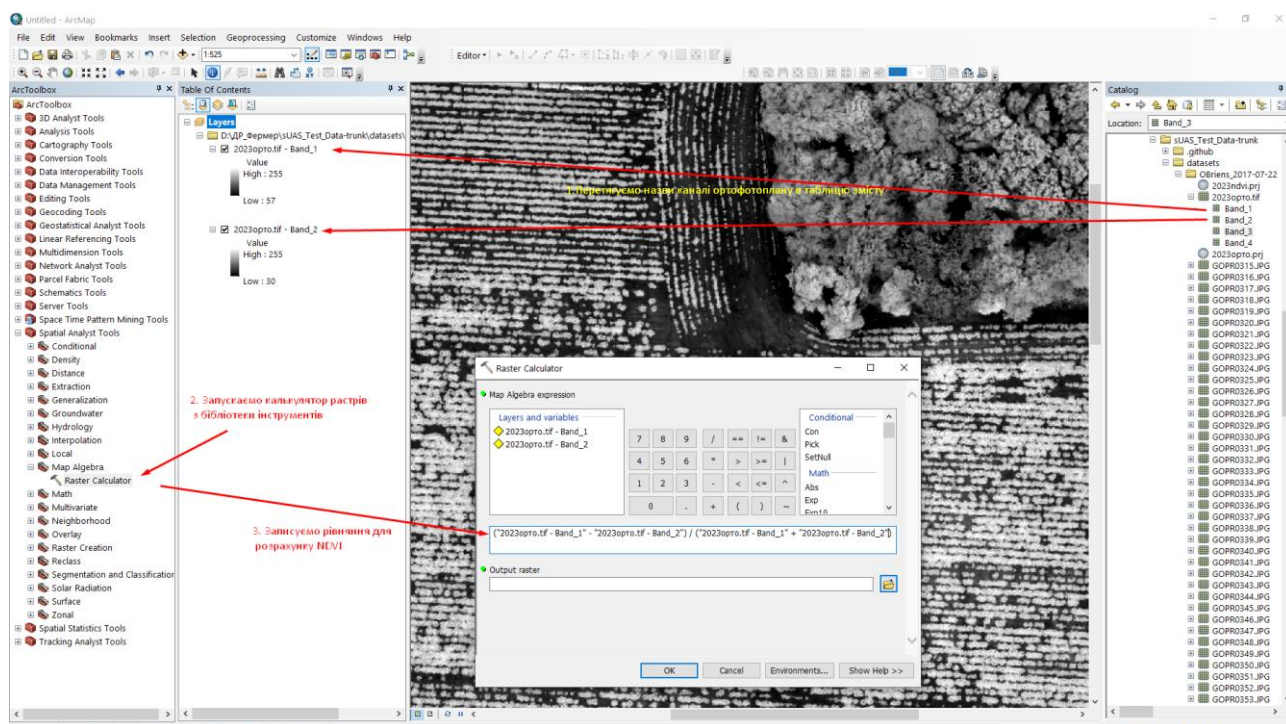
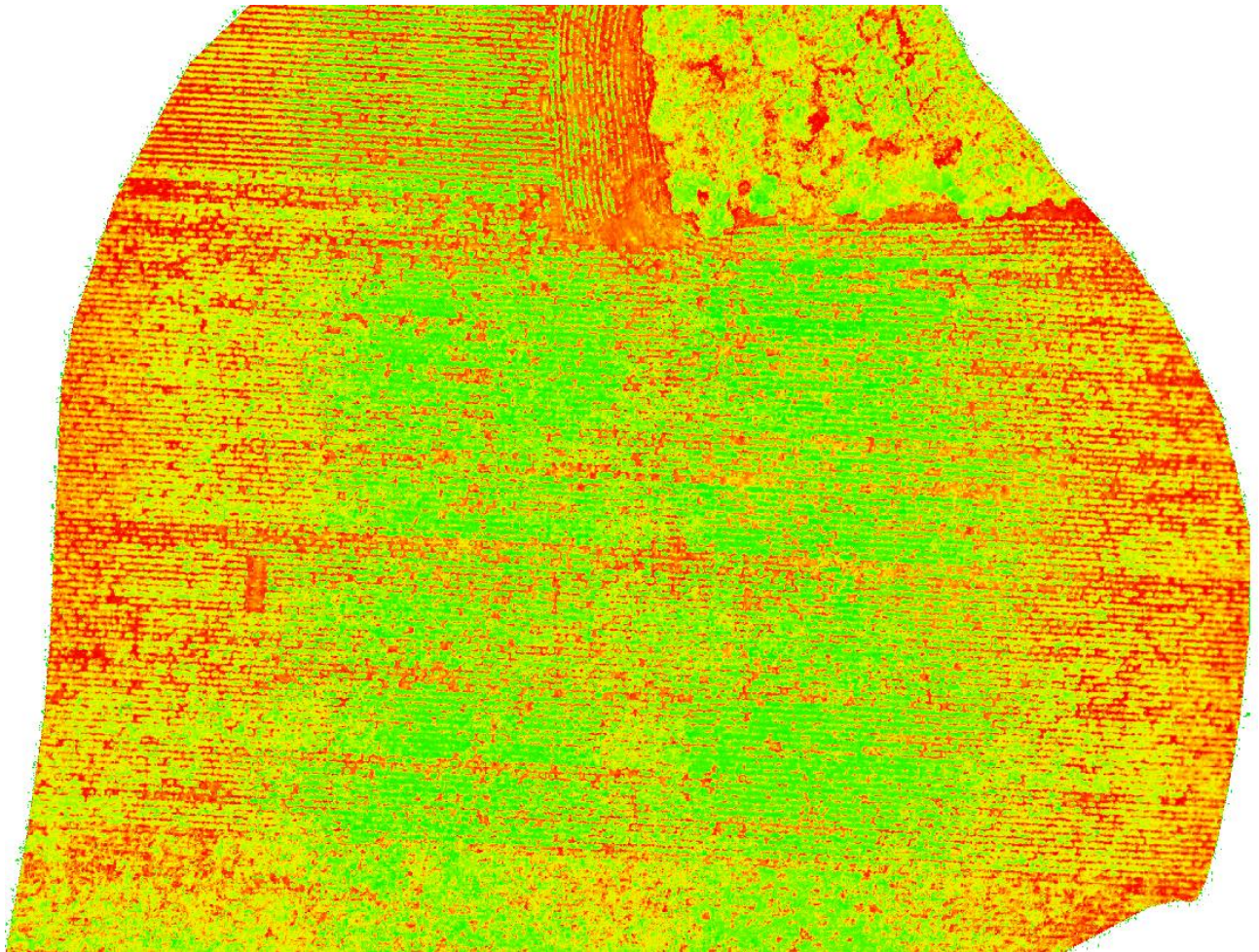


Рис.3.9. Порядок розрахунку NDVI ArcMap.

Отриману растрову карту візуалізуємо з допомогою колірної шкали, де високі значення індекса показують наявність активно вегетуючої рослинності відповідають зеленому кольору, а червоний колір – низькі значення індексу які показують слабо вегетуючу рослинність або й її повну відсутність.

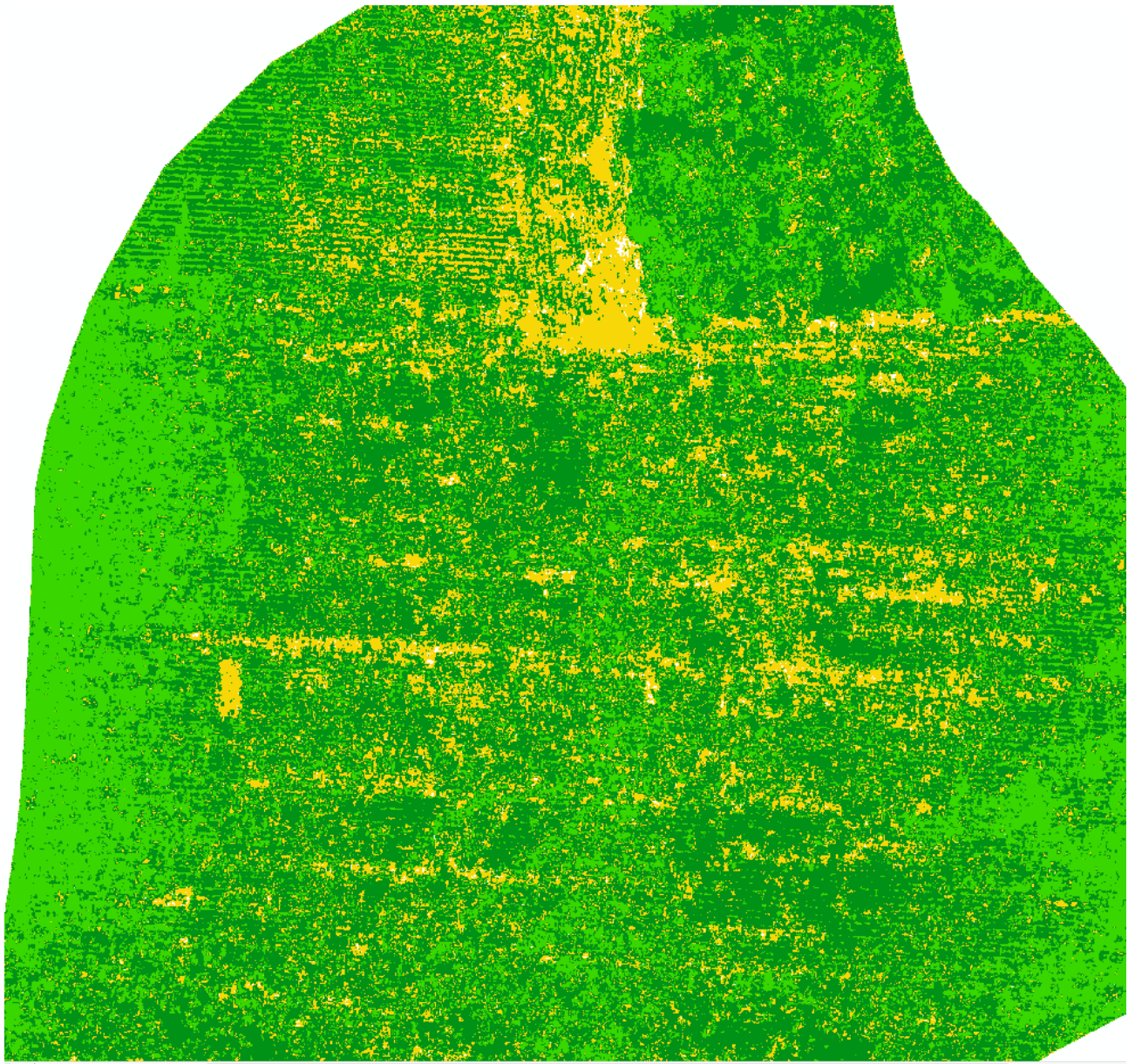


 Низькі значення Високі значення

Рис.3.10. Фрагмент індексої карти NDVI.

За описаною методикою нами розраховано також Індекс живлення культури (CVI). CVI — це похідний багатоспектральний індекс для використання зданими отриманими з світлофільтром Kolarivision Infrared Blue/NIR NDVI або подібними. Він призначений для точного порівняння значень листового рівня, особливо на фоні відкритого ґрунту. Формула для розрахунку:

$$CVI = (NIR+BLUE)-(Green)/(NIR+BLUE)+(GREEN) \quad (3.1)$$



■ Погано ■ Добре ■ Задовільно

Рис.3.11. Фрагмент індексої карти CVI.

Індексні карти надаються агрономам для прийняття подальших рішень щодо планування агротехнічних міроприємств.

4. ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ.

Високий рівень концентрації промислового виробництва та екстенсивне використання природних ресурсів і сільського господарства, протягом десятиріч перетворили Україну в одну з найнебезпечніших в екологічному відношенні країн. Так сталося, що нарощування продуктивних сил здійснювалося практично без врахування екологічних наслідків, панував відомчий, споживацький підхід до розміщення нових виробництв. Було допущено серйозних помилок в організації комплексного використання природних ресурсів, недостатня увага приділялася управлінню охороною природи та контролю якості природного навколишнього середовища.

Основними екологічними проблемами, які спостерігаються за останні 30 років в Україні є: кислотні дощі, руйнування озонового шару, потепління клімату, накопичення відходів, особливо токсичних та радіаційних, зниження біологічного різноманіття, тощо.

Земельний фонд України становить 60 млн. га і представлений переважно різновидами чорноземів, котрі займають 57% всіх сільськогосподарських угідь і становлять 68% орних земель. У середньому на одного мешканця України припадає 0,8 га сільськогосподарських угідь.

На жаль, так склалося, що в Україні розорано більше 2 млн. га продуктивних природних угідь та схилових земель, а також значно розширена площа просапних культур. Розораність земель досягла 81%, всієї території – 57%. Лише 8% території України перебуває нині у природному стані (болота, озера, гірські масиви, покриті та непокриті лісом). Змінилося екологічно допустиме співвідношення між площами ріллі, природних угідь, лісових і водних ресурсів. Це негативно вплинуло на стійкість агроландшафту, зросли ерозійні процеси. Площа еродованої ріллі за останні роки збільшилася на 33% і досягла 123,1 млн. га, а дефляційно-небезпечної – 19,8 млн. га (55,2%), вміст гумусу зменшився з 3,5 до 3,2°. Щорічно площа еродованих земель зростає на 70-80 тис. га. Значної екологічної шкоди земельні та інші ресурси зазнають внаслідок

забруднення викидами промисловості, відходами, і також недосконалого використання засобів хімізації в аграрному секторі.

Екологічна безпека включає широке коло проблем, в тому числі і заходи по організації раціонального використання природних багатств, збереженню, відтворенню і поліпшенню природного середовища, створення максимально сприятливих екологічних умов для життя і виробничої діяльності населення, охорони його здоров'я, постійного нарощування виробництва екологічно чистих, високоякісних і вітамінних продуктів харчування.

Збереженню, відтворення і поліпшення природного середовища, раціонального використання природних багатств, які здійснюються в умовах створення механізму ринкової економіки, та бажаний стан довкілля на землі можна забезпечити тільки на основі їх планування та управління. Вирішальна роль у безпеці кожної людини і суспільства в цілому належить самому суспільству, економічній суті даного соціально-економічного ладу і визначальному їм праву, як найбільш ефективному регулятору суспільно-економічних відносин між людьми і природою.

До основних чинників, які сприяють деградації ґрунтів можна віднести антропогенний вплив, а також розгул стихій, природних та посилених людиною. Це, насамперед, водна і вітрова ерозія, погіршення ґрунтової структури, механічне руйнування та ущільнення ґрунту, постійне збіднення на гумус та поживні речовини, забруднення ґрунту мінеральними добривами, отрутохімікатами, мастилами та паливом, перезволоження та засоленість земель.

Родючість є важливою властивістю землі, що відрізняє її від інших засобів виробництва. Завдяки родючості земля має ту особливість, через яку прийнято називати її продуктивною силою. Втрата ґрунтами грудкуватої структури у верхньому горизонті відбувається внаслідок постійного зменшення вмісту органічних речовин. механічного руйнування структури різноманітними знаряддями обробітку, а також під впливом опадів, вітру, перепаду температур тощо. Однією з причин втрати родючості є багаторазовий обробіток ґрунтів різними знаряддями за допомогою потужних і важких тракторів. В умовах

сьогодення важливою проблемою є постійне зменшення вмісту гумусу. Однією із основних причин цього є споживацький підхід до землі, намагання якнайбільше з неї взяти і якнайменше їй повернути. А гумус витрачається не тільки на мінералізацію речовин, а й виноситься з ґрунту в процесі ерозії, з коренеплодами та бульбоплодами, на колесах транспортних засобів, руйнується під впливом різноманітних хімічних речовин.

Внаслідок внесення високих доз мінеральних добрив ґрунт забруднюється баластними речовинами – хлоридами, сульфатами. Ґрунти також забруднюються відпрацьованими газами тракторів, комбайнів, автомобілів, мастилами та пальним, які з них виливаються під час роботи на полях. Внесення добрив вимагає особливої уваги на їх склад і концентрацію. Так, при вирощуванні культур на орних землях, використовують, як правило, концентровані форми мінеральних добрив. Концентровані мінеральні добрива майже не містять у собі мікроелементів, необхідних для росту і розвитку сільськогосподарських культур і для покращення якості врожаю. В осушених землях з дренажними водами виносяться як макро- і мікроелементи, а внесення великої кількості вапна підсилює цей процес. Друга причина, що збіднює ґрунт на макро- і мікроелементи – це відчуження значної кількості елементів високих врожаїв.

Еколого-безпечне раціональне використання земель з застосуванням запроектованих сівозмін, внесення відповідних норм органічних і мінеральних добрив, висока культура землеробства сприятиме підвищенню врожайності сільськогосподарських культур та збереженню і відновленню родючості ґрунтів.

Аналіз стану малих річок України проведений науковцями, показав, що вони забруднені на порядок більше, ніж великі, що пояснюється не тільки їх малою водністю, але й недостатньою охороною. Деградація, висихання малих річок призводить до деградації великих рік, тому проблема їх збереження й оздоровлення є однією з найгостріших для України.

У комплексі природоохоронних заходів згідно Водного кодексу та Положення „Про водоохоронні зони і прибережні смуги малих річок і водоймищ” передбачено водоохоронні зони і прибережні смуги. У

водоохоронних зонах визначено земельні ділянки для прибережних захисних смуг шириною 25-50 метрів, які мають обмежений режим господарської діяльності. Заборонено розорювання земель, садівництво, городництво, використання пестицидів і добрив, літні табори для худоби, будівництво будь-яких споруд, а також миття та обслуговування транспортних засобів відповідно до Земельного кодексу України. Також слід приділити увагу завданням з охорони підземних вод від забруднення шляхом будівництва штучних екранів в основі хвостосховищ, звалищ тощо.

Занепокоюючим є стан атмосферного повітря, оскільки нинішнє забруднення походить із різноманітних джерел, включаючи промислові та побутові відходи. Природа, яка раніше успішно ліквідовувала забруднення, тепер не справляється з цим завданням, оскільки основні джерела включають викидні гази від тваринницьких ферм, викиди транспорту та інші промислові відходи.

Стан навколишнього природного середовища значною мірою визначається рівнем лісистості та якісним станом лісів. Ліси переважно виконують захисні водоохоронні та санітарно - гігієнічні функції. Однак вони інтенсивно експлуатуються, гинуть від пожеж, внаслідок недбалого відведення земель з вирубкою під різного роду будівництво. Їх стан зумовлений не лише рівнем та інтенсивністю антропогенного впливу, але й зростаючим техногенним навантаженням, що порушує природну стійкість і функції котрі формують середовище лісових екосистем. Ліси виконують водорегулюючі функції, а також є рекреаційними об'єктами для навколишніх жителів в усі пори року і місцем заготівлі дикоростучих плодів, ягід, лікарської сировини, грибів тощо.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ

Охорона праці в Україні є системою, яка включає правові, соціально-економічні та технічні заходи для збереження здоров'я та працездатності працівників. Законодавче забезпечення цієї системи базується на положеннях Конституції та Кодексу про працю України. Покращення умов праці пов'язане з ростом продуктивності та економічною ефективністю, вимагаючи удосконалення санітарно-побутового та медичного обслуговування. Врахування небезпечних виробничих факторів є важливим для запобігання захворюваності та травматизму серед працівників.

Українське конституційне право гарантує захист життя та здоров'я громадян в трудовій діяльності, як визначено в Законі України "Про охорону праці". Регулювання трудових відносин базується на законах, зокрема на Конституції, Кодексі законів про працю та вищезгаданому Законі "Про охорону праці".

Топографо-геодезичні роботи супроводжуються впливом різних факторів на здоров'я працівників, таких як машини, випромінювання та забрудненість повітря. Організація виробничого середовища включає в себе стандарти та нормативи для забезпечення безпеки працівників.

Служба охорони праці відіграє ключову роль у вирішенні питань безпеки на підприємстві, зосереджуючись на аналізі травм, навчанні працівників та веденні документації. Незважаючи на можливі проблеми взаємодії з адміністрацією та профспілками, підприємство активно забезпечує обладнанням зон охорони праці та регулярно проводить медогляди, забезпечуючи сучасні умови праці та відповідність стандартам.

Забезпечення безпеки під час землевпорядних робіт вимагає дотримання високих стандартів безпеки. Планування включає інформування влади, забезпечення транспорту та необхідному спорядженню, а також врахування аспектів охорони праці та протипожежної безпеки. У топографо-геодезичних

роботах основною проблемою є умови роботи в умовах підвищеної запиленості та загазованості, що вимагає розгляду заходів для поліпшення умов праці.

Гігієна праці є найбільш актуальним питанням при польових роботах, де дотримання санітарних та гігієнічних правил є важливим. Ефективність гігієни праці залежить від кваліфікації працівника. При монтажі та демонтажі металевих геодезичних знаків важливе використання безпечних підйомних систем та дотримання всіх необхідних умов безпеки.

Закладка геодезичних центрів у ґрунт вимагає ретельної рекогносцировки та узгоджених схем, а робота у населених пунктах та на автомобільних шляхах вимагає узгодження з регулювальними органами. Промислова вентиляція гарантує метеорологічні умови та чистоту повітря на робочих місцях та виробничих приміщеннях.

При створенні карт і планів, а також у процесі розробки текстової частини документації, важливо витратити значний час перед комп'ютером. Для забезпечення безпечного користування електронно-обчислювальною технікою та периферійними пристроями, необхідно дотримуватися встановлених правил. Запобігання травмам та збереження здоров'я вважаються основною метою комп'ютерної безпеки. Напружена робота з клавіатурою може спричинити неприємні відчуття, а використання миші може призвести до "мишачого укусу" або хронічного розтягнення сухожиль травматичного характеру (RSI) з симптомами, такими як мурашки, біль та німіння в руці. При роботі з комп'ютером особливу увагу слід приділяти ергономіці монітора, відповідно до стандартів MPR II чи TCO'95, з мінімальною дозволяючою здатністю 768 x 640 точок на дюйм і кадровою частотою 75 Hz, щоб зробити роботу менш небезпечною для здоров'я.

В Україні в останні роки зафіксовано зростання природо-техногенних загроз, таких як природні катастрофи та промислові аварії, що спричиняють серйозні матеріальні збитки, порушення здоров'я та втрати людських життів. Заходи цивільного захисту набувають все більшого значення для ефективного захисту населення від надзвичайних ситуацій. Місцеві органи влади та виконавчі

структури регіонів взяли на себе відповідальність за розв'язання питань цивільного захисту, а організації незалежно від власності активно сприяють утворенню сил для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та захисту населення. Штаби цивільного захисту визначають ролі та обов'язки різних служб і формувань, включаючи оповіщення, зв'язок, медичні та аварійно-технічні служби. Матеріально-технічні ресурси розподіляються для виконання планів ліквідації аварій та відновлення нормального функціонування. Ефективна оперативна реакція на надзвичайні ситуації має вирішальне значення, оскільки будь-яке затримання може призвести до збільшення збитків та загибелі людей. Громадяни, що опинилися в зоні небезпеки, зобов'язані дотримуватися вказівок уповноважених осіб та готувати необхідні документи та речі для евакуації.

Формування цивільної оборони (ЦО) відіграє важливу роль у гарантуванні безпеки населення під час надзвичайних ситуацій (НС). Навчання населення є ключовим елементом у розвитку необхідних навичок та вмінь для ефективної взаємодії з індивідуальним захистом, надання першої допомоги при травматичних ситуаціях та реагування на сигнали ЦО.

В структурі ЦО існують різні служби і підрозділи, такі як служба оповіщення і зв'язку, медична служба, служба охорони громадського порядку, служба енергопостачання, аварійно-технічна служба, служба сховищ і укриттів, а також служба матеріально-технічного постачання. Ці служби виконують різноманітні завдання, спрямовані на попередження, ліквідацію та мінімізацію наслідків НС.

Для забезпечення ефективності ЦО важливо регулярно виділяти достатні фінансові ресурси на потреби різних служб, проводити систематичне навчання персоналу з питань цивільного захисту та періодично перевіряти технічну готовність та безпеку потенційно-небезпечних об'єктів. Це сприятиме підвищенню рівня захисту цивільного населення та готовності до дії в умовах надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

За результатами виконання кваліфікаційної магістерської роботи можна зробити наступні висновки:

1. Виконано аналіз наукових літературних джерел та публікацій виробників аерознімального обладнання за тематикою аерознімання полів з борту БПЛА.
2. Теоретичні та методичні засади дистанційного вивчення полів засновані на використанні багатоспектральних даних, для отримання яких на БПЛА встановлюються спеціальні камери, пристосовані для реєстрації відбиття ґрунтами та рослинністю світла видимої та інфрачервоної ділянки спектру. Алгоритми опрацювання таких знімків включені до комп'ютерних фотограмметричних програм.
3. Описано програмне забезпечення з відкритим кодом OpenDroneMap, яке призначене для фотограмметричного опрацювання матеріалів аерознімання з БПЛА.
4. В ході дослідження виконано повний робочий процес фотограмметричного опрацювання багатоспектральних аерознімків земельних угідь аграрного підприємства в програмі OpenDroneMap. Створено карти полів – це ортофотоплан та цифрова модель рельєфу поля. Створено карти вегетаційних індексів: карту нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI), яка потрібна для вивчення об'ємів біомаси рослин та карту вегетаційного індексу живлення культури (CVI), яка потрібна для оцінки здоров'я рослин.
5. Описане в роботі апаратне та програмне забезпечення є на нашу думку найбільш оптимальним варіантом забезпечення методики дистанційного моніторингу поля з допомогою БПЛА для невеликого фермерського господарства. Основними частинами тут є квадрокоптер, цифрова фотокамера RGB, адаптована для встановлення світлофільтра із пропусканням світла ближньої інфрачервоної ділянки, відкрите

програмне забезпечення для фотограмметричного опрацювання OpenDroneMap. Для більш глибокого вивчення результатів моніторингу, а саме індексних карт можна використовувати геоінформаційні програми, серед переліку яких також є відкрите, вільне програмне забезпечення.

6. В роботі розглянуто питання охорони навколишнього середовища та охорони праці.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бурштинська, Х. В. Аерокосмічні знімальні системи [Текст]: підручник / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2013. - 315 с.
2. Данкевич В.Є., Данкевич Є.М. Моніторинг сільськогосподарських угідь із застосуванням систем дистанційного зондування земель. Економіка АПК, 2019, № 8 с.27-36.
3. Дорожинський О. Л. Аналітична та цифрова фотограмметрія : навч. посібник / О. Л. Дорожинський. – Львів : Вид. НУ «Львівська політехніка», 2002. – 164 с.
4. Дорожинський О. Л. Фотограмметрія : підручник / О. Л. Дорожинський, Р. Тукай – Львів : Вид-во. НУ «Львівська політехніка», 2008. – 332 с.
5. ДСТУ 4758:2007. Національний стандарт України. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять. Чинний від 2007-10-01. Держспоживстандарт України. -2007.
6. Кохан С.С., Востоков А.Б. Дистанційний моніторинг земельних ресурсів: навч. посібник. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2018. 264 с.
7. Основи дистанційного зондування Землі : історія та практичне застосування : навч. посіб. / С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, Л. Я. Юрків. — К. : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. — 316 с.]
8. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України від 08.12.2016 № 661 : Наказ МО України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text.>]
9. Про затвердження Правил технічної експлуатації безпілотних авіаційних комплексів I класу державної авіації України від 10.08.2018 № 401 [Електронний ресурс] : Наказ МО України. –Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1062-18#Text>

- 10.Смірнов Є. І. Фотограмметрія у землеустрої: Навчальний посібник. / Є. І. Смірнов – Львів: Вид. Львівського національного аграрного університету, 2013. – 333 с.
- 11.Нестеренко С. Г. Сучасні дистанційні методи та геоінформаційні технології в дослідженні територій : конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій / С. Г. Нестеренко, О. В. Афанасьєв, М. Л. Мироненко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 127 с.
- 12.AI, Robotics, And The Future Of Precision Agriculture. RESEARCHBRIEFS. July 7, 2017. <https://www.cbinsights.com/research/ai-robotics-agriculture-tech-startups-future/>.
- 13.Get ready, ODM 3.0 is here! – Pierotofy – November 28, 2022. –Режим доступу: <https://www.opendronemap.org/2022/11/get-ready-odm-3-0-is-here/>
- 14.GitHub–Mapillary/OpenSfM: Конвеєр структури з відкритим вихідним кодом. 2020. –Режим доступу: <https://github.com/mapillary/OpenSfM>
- 15.Liu, C.; Zhao, J.; Sun, N.; Yang, Q.; Wang, L. IT-SVO: Improved Semi-Direct Monocular Visual Odometry Combined with JS Divergence in Restricted Mobile Devices. *Sensors* 2021, 21, 2025.
- 16.Lowe, A., Harrison, N. & French, A.P. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods* 13, 80 (2017). –Режим доступу: <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0233-z>
- 17.Mahendra Bhandari, Anjin Chang, Jinha Jung, Amir M. H. Ibrahim, Jackie C. Rudd, Shannon Baker, Jose Landivar, Shuyu Liu, Juan Landivar. Unmanned aerial system-based high-throughput phenotyping. *The Plant Phenome Journal*. Volume 6 Issue 1. First Published online: February 23, 2023
- 18.Meier, U., Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Heß, M., Lancashire, P., Schnock, U., Stauß, R., Boom, T., Weber, E. & Zwerger, P. (2009). The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants-history and

- publications. Journal für Kulturpflanzen, 61, 41-52. –Режим доступу:
<http://dx.doi.org/10.5073/JfK.2009.02.01>
19. Muñoz, J.; López, B.; Quevedo, F.; Monje, C.A.; Garrido, S.; Moreno, L.E.
Multi UAV Coverage Path Planning in Urban Environments. Sensors 2021, 21,
7365.
20. Olson D., Anderson J. (2021). Review on unmanned aerial vehicles, remote
sensors, imagery processing, and their applications in agriculture. Agronomy
Journal. Volume 113. Issue 2. March/April 2021. Pages 971-992
21. Open Drone Map — Local and Urban Scale Mapping Available to All – Amos
J Bennett – May 6, 2021. –Режим доступу:
<https://towardsdatascience.com/open-drone-map-local-and-urban-scale-mapping-available-to-all-2857b61e7803>
22. OpenDroneMap. Навчальні посібники—Створення цифрових моделей
рельєфу. 2020.: –Режим доступу: <https://docs.opendronemap.org/tutorials/>
23. OpenDroneMap/ODM GitHub. –Режим доступу:
<https://github.com/OpenDroneMap/ODM>).
24. OpenDroneMap: a Toolkit for Processing Aerial Drone Imagery – Eric Van
Rees – 2017. –Режим доступу:
<https://www.commercialuavnews.com/infrastructure/opendronemap-toolkit-processing-aerial-drone-imagery>
25. Vacca Giuseppina. WEB Open Drone Map (WebODM) a Software Open
Source to Photogrammetry Process (10728). FIG Working Week 2020 Smart
surveyors for land and water management Amsterdam, the Netherlands, 10–14
May 2020.