

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННЯ ТА ІНФРАСТРУКТУРНОГО
РОЗВИТКУ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ І ГЕОІНФОРМАТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Освітнього ступеня «Магістр»

на тему: **“Методика застосування матеріалів аерознімання з БПЛА
при створенні карт-завдань для хімічного обробітку полів”**

Виконав: студент гр. ЗВ-62

Спеціальності 193 Геоземна інженерія та землеустрій

В.Р. Бесарабчик

Керівник: доцент, к.т.н. І.З. Колб

Рецензенти: _____

(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2025

УДК 528.9

Методика застосування матеріалів аерознімання з БПЛА при створенні карт-завдань для хімічного обробітку полів. Бесарабчик В.Р. Кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025, – 68 с. текстової частини, 1 таблиця, 29 рисунків, 26 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі У роботі розглянуто застосування безпілотних літальних апаратів для створення карт припису цільового оприскування бур'янів із використанням програмного забезпечення Pix4Dfields. На основі аерофотознімків високої роздільної здатності виконано побудову спектральних індексів та сегментацію рослинного покриву з метою виявлення зон підвищеної забур'яненості. Приведено алгоритм формування карт припису із застосуванням порогових значень індексів і зонування поля за рівнем необхідної обробки. Методика дозволяє підвищити точність внесення гербіцидів, зменшити витрати хімічних препаратів і мінімізувати негативний вплив на довкілля. Отримані результати підтверджують ефективність інтеграції БПЛА та цифрових інструментів у системи точного землеробства.

Розглянуті питання охорони довкілля.

Приведено висновки та рекомендації.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БПЛА), ефективність використання, сільське господарство, точне землеробство, карти приписів.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
Розділ 1. Теоретичні основи застосування технології аерознімання полів як джерела інформації для створення карт-завдань для хімічного обробітку угідь	8
1.1. Точне землеробство як частина цифровізації у сільськогосподарській діяльності	8
1.2. Дистанційне зондування полів в системі точного землеробства.....	12
1.3. Дрони для аерознімання полів.....	20
1.4. Карти-завдання для хімічного обробітку полів. Методи створення та способи використання.....	24
Розділ 2. Технологія дистанційного виявлення бур'янів за матеріалами аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА).	31
2.1. Типові рішення для виконання аерознімання полів з метою виявлення бур'янів.....	31
2.2. Характеристики знімальної апаратури.....	40
2.2. Технологічна схема фотограмметричного опрацювання.	25
2.3. Методика виділення зон хімічного обробітку за ортофотопланами та картами вегетаційних індексів.....	29
Розділ 3 Отримання та опрацювання матеріалів аерознімання з БПЛА з метою створення карт-завдань для внесення гербіцидів.	46
3.1. Підготовка безпілотного літального апарата до аерознімання поля	46
3.2. Методика створення карти завдання для хімічного обробітку за картами вегетаційних індексів.....	50
Розділ 4. Охорона довколишнього середовища	59
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66

ВСТУП

Одним із ключових напрямів цифрової трансформації аграрного сектору є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для отримання детальних просторових даних, їх подальшої аналітичної обробки та застосування у процесах прийняття рішень. Зокрема, це застосовується для високоточного картографування агроценозів і формування диференційованих карт припису для наземних та повітряних систем внесення засобів захисту рослин.

Однією з найбільш актуальних задач сучасного рослинництва є своєчасне та точне виявлення бур'янової рослинності, оскільки її нерівномірне поширення ускладнює використання традиційних методів суцільного внесення гербіцидів. Диференційоване оприскування з використанням карт припису не тільки підвищує економічну ефективність і знижує витрати на хімічні препарати, але й суттєво мінімізує негативний вплив на навколишнє природне середовище, сприяє зменшенню пестицидного навантаження та підвищує рівень екологічної стабільності агроєкосистем.

Таким чином, актуальність даної роботи зумовлена зростаючою потребою у впровадженні високотехнологічних рішень для автоматизованого моніторингу бур'янів і точного оприскування з використанням безпілотних технологій. Дослідження спрямоване на аналіз методики створення карти припису для цільового гербіцидного обробітку, оцінку ефективності використання індексів рослинності як основи алгоритмічного виявлення бур'янів та визначення практичних можливостей програмного забезпечення Pix4Dfields у контексті точного землеробства.

Об'єктом дослідження є процес дистанційного моніторингу посівів та процес створення завдань для диференційованого хімічного обробітку полів із використанням безпілотних літальних апаратів і програмних засобів аналізу просторово-спектральних даних.

Предметом дослідження є методика створення карти припису для цільового оприскування бур'янів у середовищі Pix4Dfields на основі аерофотознімків із БПЛА та індексів рослинності.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасні технології дистанційного зондування, що застосовуються для моніторингу стану рослинності та виявлення бур'янової рослинності.
2. Дослідити функціональні можливості Pix4Dfields у частині побудови ортофотопланів, спектральних індексів та генерації карт припису.
3. Виконати збирання аерофотознімків з БПЛА, забезпечивши належну просторову роздільність та спектральну інформативність для ідентифікації бур'янів.
4. Здійснити обробку даних в Pix4Dfields, включаючи генерацію індексів рослинності (NDVI, VARI, NDRE) та сегментацію ділянок із підвищеною забур'яненістю.
5. Розробити алгоритм формування карти припису, що включає вибір порогових значень індексів, класифікацію зон забур'яненості та визначення норм диференційованого внесення гербіцидів.

Розділ 1. Теоретичні основи застосування технології аерознімання полів як джерела інформації для створення карт-завдань для хімічного обробітку угідь

1.1. Точне землеробство як частина цифровізації у сільськогосподарській діяльності

Термін «**цифрове сільське господарство**» позначає виробництво сільськогосподарської продукції із застосуванням більш автономних від безпосередньої участі людини виробничих і бізнес процесів з якомога меншим впливом на оточуюче середовище. Масове застосування принципів такого підходу вже забезпечує економічний ефект у десятки процентів підвищення урожайності, зниження втрат і затрат на виробництво одиниці продукції. Паралельно розвивається **точне землеробство** (від англійського Precision Agriculture - точне сільське господарство і Precision Farming - точне землеробство) - стратегія управління а також підхід до менеджменту, що базується на систематичному збиранні, опрацюванні та інтерпретації часових, просторових і індивідуальних характеристик поля та їх інтеграції з іншими джерелами інформації. Врахування мінливості аграрних параметрів дає змогу ухвалювати обґрунтовані рішення й забезпечувати високу точність роботи сільськогосподарської техніки, що в результаті сприяє раціональному використанню ресурсів, підвищенню продуктивності, покращенню якості, зростанню рентабельності та стійкому розвитку виробництва [1,6,15].

Головна мета точного землеробства при вирощуванні сільськогосподарських культур полягає в максимізації врожайності та економічних вигод за одночасного зменшення капітальних витрат і впливу на навколишнє середовище. Наукова концепція точного землеробства базується на розумінні того, що в межах одного поля існують просторові неоднорідності. Для їх оцінювання та виявлення застосовують сучасні технології, зокрема системи глобального позиціонування (GPS, ГЛОНАСС), спеціалізовані датчики, аерофотознімки та супутникові знімки, а також програмні інструменти, розроблені для

агроменеджменту. Отриману інформацію використовують під час планування посівів, визначення норм внесення добрив і засобів захисту рослин, точнішого прогнозування врожайності та здійснення фінансового планування.

Точне землеробство – це комплексна високотехнологічна багаторівнева система сільськогосподарського менеджменту, яка поєднує технології глобального позиціонування (GPS), географічні інформаційні системи (GIS), технології оцінки урожайності (Yield Monitor Technologies), змінного нормування (Variable Rate Technology), дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і направлена на отримання максимального об'єму якісній і найбільш дешевій сільськогосподарської продукції з врахуванням норм екологічної безпеки. В розумінні розподілу часу між збором інформації і застосуванням відповідних агротехнічних міроприємств відрізняють:

- двохетапні підходи (off-line) або підходи на основі картографування;
- одноетапні підходи (on-line) або прийняття рішень в реальному масштабі часу («real-time») або сенсорні підходи;
- різні комбінації одно- і двохетапних підходів або сенсорний підхід з підтримкою картографування (map overlay).

Означені технології формують так звану «піраміду точного землеробства», тобто структурований набір технологій з використанням GPS, безпілотних літальних апаратів, технологій диференційованого внесення добрив, висіву насіння та використання іншої техніки та інформаційних засобів.

Упродовж останніх років поряд із терміном “точне землеробство” дедалі частіше використовуються поняття *climate-smart farming* (кліматично орієнтоване сільське господарство) та *smart farming* (інтелектуальне або “розумне” сільське господарство). Кліматично орієнтоване землеробство розглядається як підхід до ведення аграрного виробництва, що передбачає адаптацію технологій до природно-кліматичних особливостей регіону та зменшення негативного антропогенного впливу на довкілля, зокрема скорочення викидів парникових газів у атмосферу [9,16].

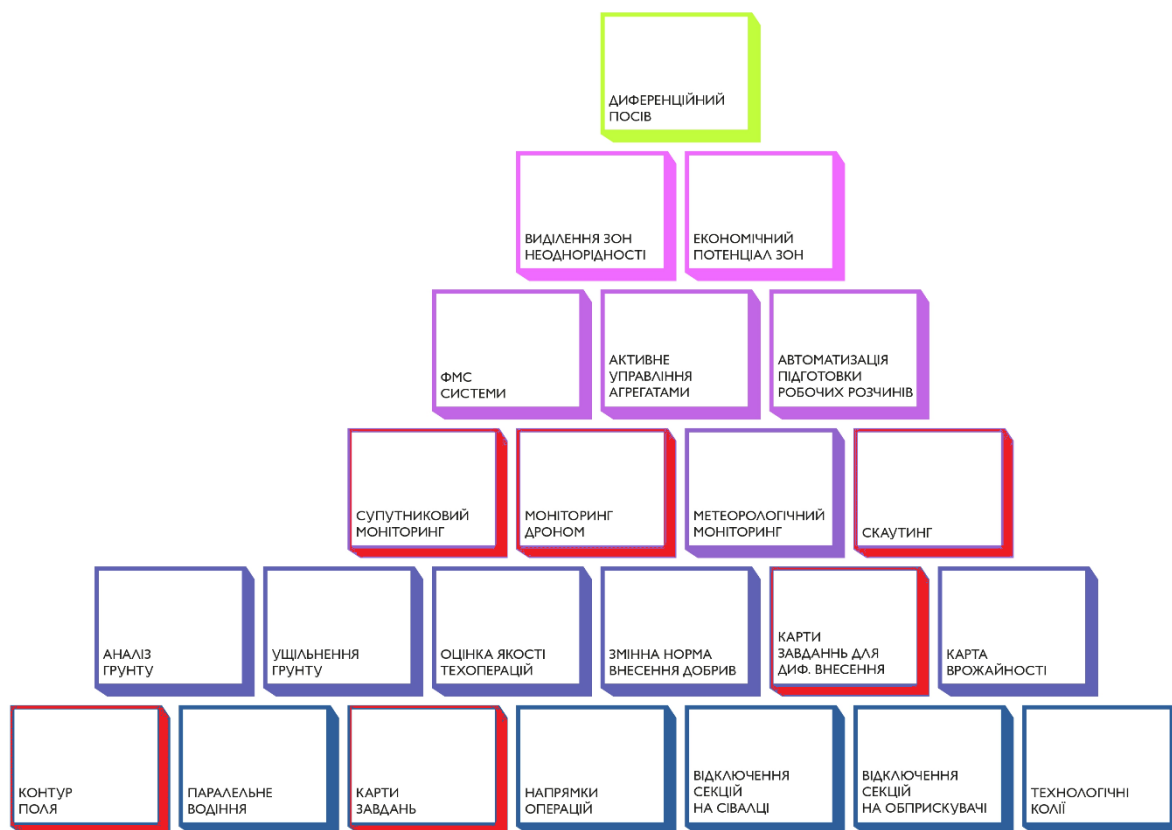


Рис.1.1. Піраміда процесів точного землеробства з виділенням червоним кольором етапів застосування даних дистанційного зондування (за даними сайту <https://aggeek.net/ru-blog/piramida-tochnogo-zemlerobstva>)

Інтелектуальне сільське господарство, у свою чергу, формується як сучасна концепція сталого агровиробництва, спрямована на зміцнення продовольчої безпеки шляхом удосконалення й раціонального застосування компонентів точного землеробства - систем високоточної навігації, сенсорних платформ для моніторингу ґрунту, стану рослин і параметрів довкілля, а також аналітичних інструментів для підтримки оптимальних управлінських рішень. У межах цієї парадигми ключовим є ефективніший облік внутрішньопольової варіабельності властивостей родючості завдяки розширеному використанню технологій глобального позиціонування, систем збору та управління даними, сенсорних засобів, інформаційно-аналітичних платформ і прогресивних методів вирощування сільськогосподарських культур.

Дистанційне зондування сільськогосподарських угідь становить один із фундаментальних елементів сучасних технологій точного землеробства, оскільки забезпечує високочасову та високопросторову деталізацію спостережень за станом агроценозів.

Застосування супутникових систем, безпілотних літальних апаратів та спектральних сенсорних платформ створює можливість регулярного, безконтактного й методологічно уніфікованого контролю просторової неоднорідності посівів, виявлення зон стресового впливу, оцінювання потенційної продуктивності та моніторингу ефективності здійснюваних агротехнічних заходів. Отримані дані, представлені у формі карт мультиспектральних індексів, теплових моделей або структурних карт, інтегруються у геоінформаційні системи господарств та використовуються для формування карт-завдань диференційованого внесення добрив, засобів захисту рослин або параметричного регулювання зрошення. У цьому контексті дистанційне зондування функціонує не лише як засіб отримання інформації, а як високотехнологічний аналітичний інструментарій, що сприяє оптимізації використання ресурсів, підвищенню продуктивності та мінімізації екологічних ризиків, забезпечуючи науково обґрунтовану, точну й екологічно збалансовану систему управління агровиробництвом.

Технології дистанційного зондування для потреб сільського господарства умовно поділяються на два основні напрями — космічне дистанційне зондування та аерознімання з безпілотних літальних апаратів. Космічні системи високого і середнього розрізнення забезпечують періодичне, регулярне охоплення визначеної території. Мультиспектральні сенсори цих платформ забезпечують отримання спектральних індексів стану рослинності (NDVI, EVI, NDRE), карт просторового розподілу вологості ґрунту, показників розвитку біомаси та виявлення стресових проявів, зумовлених дефіцитом елементів живлення або води. Незважаючи на те, що роздільна здатність супутникових даних інколи є недостатньою для дрібноконтурних агроландшафтів, супутникові платформи характеризуються

високою періодичністю знімання, стабільністю спектральних вимірювань, широкою доступністю та зручністю інтеграції у системи агромоніторингу.

Аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів забезпечує значно вищу просторову деталізацію — на рівні 1–5 см/піксель, що дає змогу фіксувати дрібні неоднорідності посівів та локалізовані проблемні ділянки [1,7]. БПЛА, оснащені RGB, мультиспектральними, тепловими та гіперспектральними сенсорами, застосовуються для побудови ортофотопланів, індексних карт, цифрових моделей рельєфу та здійснення об'єктно-орієнтованої класифікації рослинного покриву. Такі платформи є особливо ефективними в умовах обмеженої супутникової видимості, зокрема за значної хмарності, а також у випадках, коли необхідне точне й локалізоване обстеження окремих фрагментів поля [15,16]. Отримані з БПЛА дані широко використовуються для високоточного внутрішньопольового зонування, формування карт-завдань диференційованого внесення та контролю якості виконання агротехнологічних операцій.

1.2. Дистанційне зондування полів в системі точного землеробства

Цифрове сільське господарство потребує більш високого рівня технічного забезпечення, що базується на комплексах автоматизованих або дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для моніторингу агроценозів та управління агротехнологіями шляхом диференційованого внесення пестицидів і добрив [12,14]. БПЛА забезпечують якісне внесення засобів захисту рослин і добрив у оптимальні агротехнічні строки, за високої вологості ґрунту, на складних рельєфах полів, гірських схилах садів та виноградників, рисових полях, у пізні періоди розвитку агроценозів, що мінімізує ризики, пов'язані з недобором врожаю та зниженням його якості, а також із фінансовими втратами сільськогосподарських виробників. Водночас, незважаючи на широке застосування точного землеробства

в розвинених країнах світу, диференційоване внесення добрив і пестицидів здебільшого здійснюється наземною технікою.

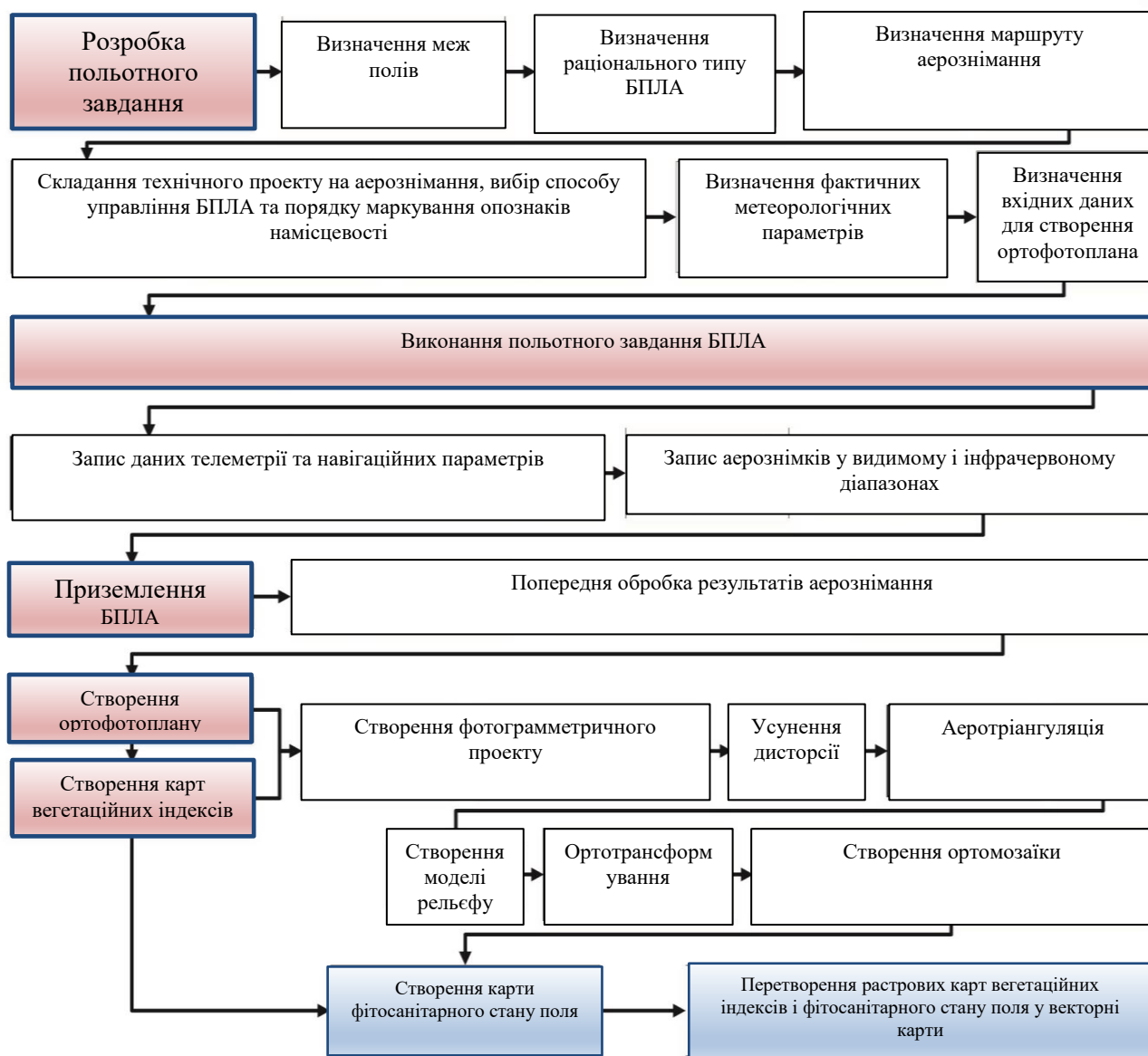


Рис.1.2. Схема застосування технологій дистанційного зондування з БПЛА при дослідженні полів

Дистанційний збір інформації про стан рослинності відбувається із застосуванням одно-чи багатоканальних сенсорів, які працюють на реєстрацію відбитого від поверхні землі і рослин випромінення.

RGB-сенсори дронів забезпечують високоякісне зображення видимого спектра світла, що ефективно використовується для інспекційних та

документальних цілей, тоді як мультиспектральні сенсори реєструють невидимі довжини хвиль, що дають додаткову інформацію, недоступну при звичайній фотозйомці. Розуміння цих принципів відмінностей дозволяє фахівцям обирати найбільш підходящу технологію відповідно до конкретних завдань та фінансових обмежень. За останні роки технологія мультиспектральної візуалізації значно розвинулася, що зробило спектральний аналіз доступним для застосувань, які раніше вимагали дорогих супутникових даних або спеціалізованих авіаційних сенсорів. Це відкриває нові можливості використання, одночасно підвищуючи точність і надійність традиційного дистанційного зондування.

RGB-датчики реєструють довжини хвиль видимого світла приблизно від 400 до 700 нм, використовуючи ті ж спектральні діапазони, що й людське око. Професійні RGB-камери забезпечують високороздільні зображення, що сприяють візуальному аналізу, фотограмметрії та документуванню, де потрібна детальна геометрична інформація. Просторове розрізнення RGB-сенсорів зазвичай перевищує показники мультиспектральних систем, дозволяючи отримувати роздільну здатність 1–2 см на піксель порівняно з 5–10 см для мультиспектральних датчиків. Професійна RGB-візуалізація є ефективною для завдань, що потребують високої деталізації, таких як інспекція інфраструктури, архітектурне документування та точне картографування.

Мультиспектральні сенсори реєструють кілька вузькоспектральних діапазонів у видимому та ближньому інфрачервоному спектрах, зазвичай охоплюючи 4–12 різних смуг, що дозволяє виявляти інформацію, недоступну для сприйняття людським оком. Професійні мультиспектральні системи застосовуються для аналізу стану рослинності, ідентифікації матеріалів та екологічного моніторингу, де необхідна спектральна дискримінація. Вибір інфрачервоного (ІЧ) спектру або так званого «теплового випромінювання» для дослідження рослинності зумовлений тим, що в цьому діапазоні об'єкти самостійно випромінюють енергію, що зменшує залежність результатів від зовнішнього освітлення (рис. 1.3).

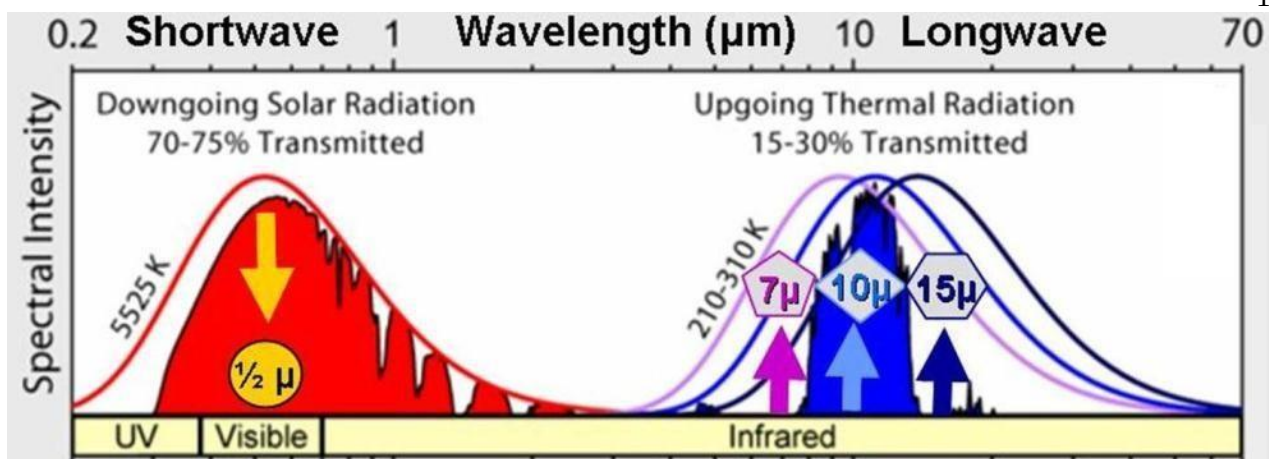


Рис. 1.3. Залежність прозорості атмосфери від довжини хвилі випромінювання

Чутливість у ближньому інфрачервоному (БІЧ) діапазоні надає мультиспектральним сенсорам можливість виявляти стан рослинності, вміст води та властивості матеріалів, які істотно впливають на інфрачервоне відбиття, але залишаються непомітними на RGB-зображеннях. Використання професійного аналізу в БІЧ-діапазоні дозволяє ідентифікувати стресові стани, хвороби та умови навколишнього середовища, що впливають на розвиток рослин та сільськогосподарських культур.

Вибір спектральних діапазонів залежить від конкретних мультиспектральних систем, які оптимізуються під різні завдання, зокрема сільське господарство, екологічний моніторинг або ідентифікацію матеріалів. Раціональний підбір датчика передбачає оцінку того, які спектральні смуги забезпечують максимально інформативні дані для обраних аналітичних застосувань. Радіометричне калібрування забезпечує можливість кількісного аналізу спектрального відбиття, що підтримує наукові дослідження та моніторингові програми, де необхідні вимірювання, а не лише візуальна оцінка. Професійний мультиспектральний аналіз базується на каліброваних даних відбиття для точного обчислення індексів рослинності та класифікації матеріалів.

ІЧ діапазон є перспективним для дистанційної діагностики стану рослин, оскільки саме в ньому:

- ближній інфрачервоний (NIR) (700-1400 нм) – відбивні характеристики залежать від структури клітин;
- короткохвильовий інфрачервоний (1400-2000 нм) – відбивні характеристики залежать від вмісту води в тканинах;

Оптичний діапазон, який є більш складним для моніторингу через відсутність власного випромінювання об'єктів, а тому високу чутливість до зовнішнього освітлення, також є перспективним для дистанційної діагностики стану рослин, оскільки саме в оптичному діапазоні (рис. 1.4):

- синій канал (400-499 нм), знаходиться під сильним впливом поглинання хлорофілом і каротиноїдами;
- синьо-зелений канал (500-549 нм) призводить до зеленого піку за 550 нм;
- червоний канал (650-699 нм) пов'язаний із сильним поглинанням хлорофілом.

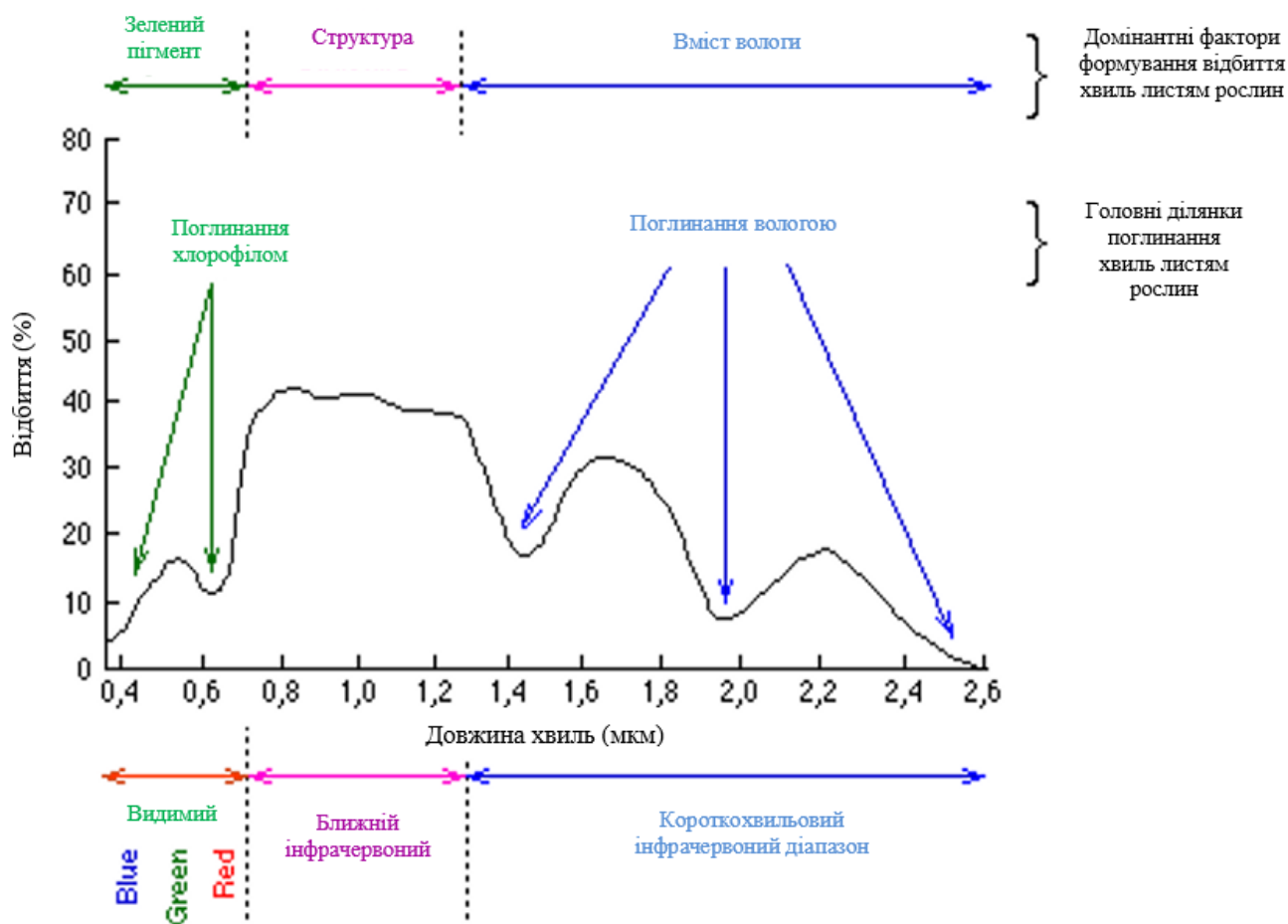
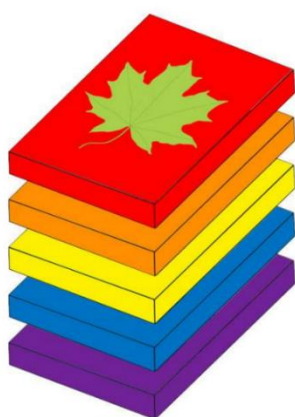


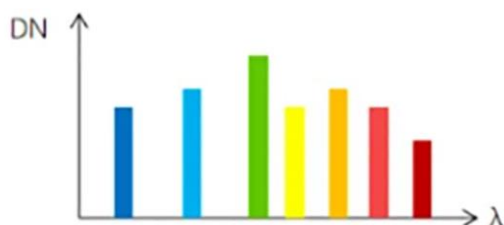
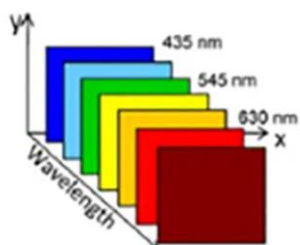
Рис. 1.4. Залежність відбивної здатності листя від довжини хвилі

Гіперспектральне зображення передбачає захоплення та аналіз великої кількості даних у вузькому безперервному діапазоні електромагнітних даних спектр, генеруючи спектр високої роздільної здатності для кожного пікселя на зображенні. Таким чином, гіперспектральна камера забезпечує гладку спектр. Спектр, що забезпечується мультиспектральною камерою, є ступінчастим або зубчастим і не може точно відобразити спектральні характеристики.

Мультиспектральне зображення

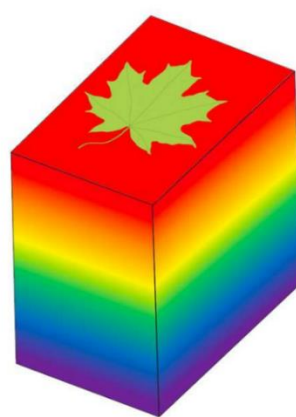


Multispectral

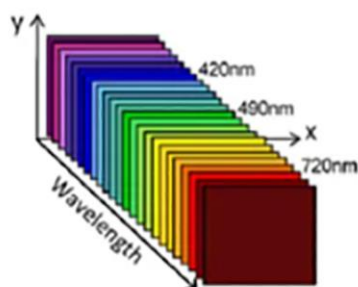


Кількість спектральних каналів: 3-20

Гіперспектральне зображення



Hyperspectral



Від кількох десятків до кількох сотень

Рис.1.5. Характеристики мультиспектральних та гіперспектральних засобів дистанційного зондування

Основна відмінність гіперспектральних і мультиспектральних камер - кількість діапазонів, які вони записують, і ширина діапазону (тобто спектральна роздільна здатність). За стандартним визначенням гіперспектральна камера записує понад 100 діапазонів, тоді як мультиспектральна камера реєструє менше діапазонів. Однак це визначення не враховує спектральну смугу пропускання або частоту дискретизації. Це означає, якщо камера охоплює спектральний діапазон 400-600 нм і записує 50 діапазонів, це не гіперспектральна камера, а якщо вона охоплює 400-800 нм і має таку саму частоту дискретизації (це означає, що цього разу вона записує 100 діапазонів), це гіперспектральна камера.

Опишемо фактори, які є суттєвими для використання різнотипних систем дистанційного зондування для вирішення задач точного землеробства.

Для інспекції інфраструктури використовуються RGB-датчики, які забезпечують візуальну документацію високої роздільної здатності щодо структурних станів, дефектів поверхні та потреб у технічному обслуговуванні. Професійна оцінка інфраструктури вимагає детальної візуальної інформації, яка підтримує аналіз стану та планування технічного обслуговування. Картографічні та геодезичні програми використовують RGB-зображення для фотограмметричної обробки, яка створює точні 3D-моделі, ортофотоплани та інші топографічні продукти. Професійне картографування вимагає високої просторової роздільної здатності та геометричної точності, які ефективно забезпечують RGB-сенсори. Робочі процеси обробки RGB використовують стандартне фотографічне програмне забезпечення та методи, які багато професіоналів вже розуміють, що зменшує вимоги до навчання та складність обробки. Професійний аналіз RGB використовує існуючий досвід у фотографії та картографуванні, вимагаючи при цьому мінімальних спеціалізованих знань дистанційного зондування.

Гіперспектральне зображення надає більш детальні дані, ніж мультиспектральне зображення, що дозволяє отримати більш конкретні результати аналізу і більш точну ідентифікацію різних матеріалів і речовин. Мультиспектральне зображення може не розрізняти схожі матеріали через

обмежену спектральну роздільну здатність. Для більшості мультиспектральні камери на ринку мають спектральний діапазон, обмежений 400–1000 нм, з типовою кількістю смуг від 4 до 5. Ці обмеження мають важливі наслідки для багатьох застосувань. Мультиспектральна обробка вимагає спеціалізованого програмного забезпечення та досвіду в спектральному аналізі, розрахунку рослинного індексу та класифікації матеріалів, що може вимагати додаткового навчання та інвестицій у програмне забезпечення. Професійний мультиспектральний аналіз вимагає досвіду в дистанційному зондуванні та відповідних програмних інструментів для ефективного аналізу.

RGB-камери коштують від сотень до тисяч доларів залежно від роздільної здатності та вимог до якості, що робить високоякісне RGB-зображення доступним для більшості професійних застосувань. Вибір професійного RGB-обладнання поєднує вимоги до якості зображення з бюджетними обмеженнями та потребами застосування.

Вартість багатоспектральних сенсорних систем зазвичай становить від 5000 до 50 000 доларів США залежно від спектральної роздільної здатності та вимог до точності, що являє собою значні капіталовкладення, які потребують ретельного обґрунтування. Професійний вибір багатоспектрального обладнання вимагає чіткого розуміння вимог застосування та очікуваної рентабельності інвестицій.

Вартість інтеграції платформи варіюється залежно від типу датчика, причому RGB-камери зазвичай легко інтегруються з більшістю платформ дронів, тоді як мультиспектральні датчики можуть вимагати спеціалізованих послуг з монтажу та інтеграції. Професійний вибір платформи повинен враховувати вимоги до сумісності та інтеграції датчиків.

1.3. Дрони для аерознімання полів

Технології точного землеробства потребують високого рівня технічного забезпечення, що базується на програмованих, повністю автономних або дистанційно керованих безпілотних авіаційних системах, які містять комплекси автоматизованих або дистанційно керованих БПЛА для моніторингу агроценозів та управління агротехнологіями шляхом диференційованого внесення мінеральних добрив, пестицидів та інших агрохімікатів [11,12,24,25].

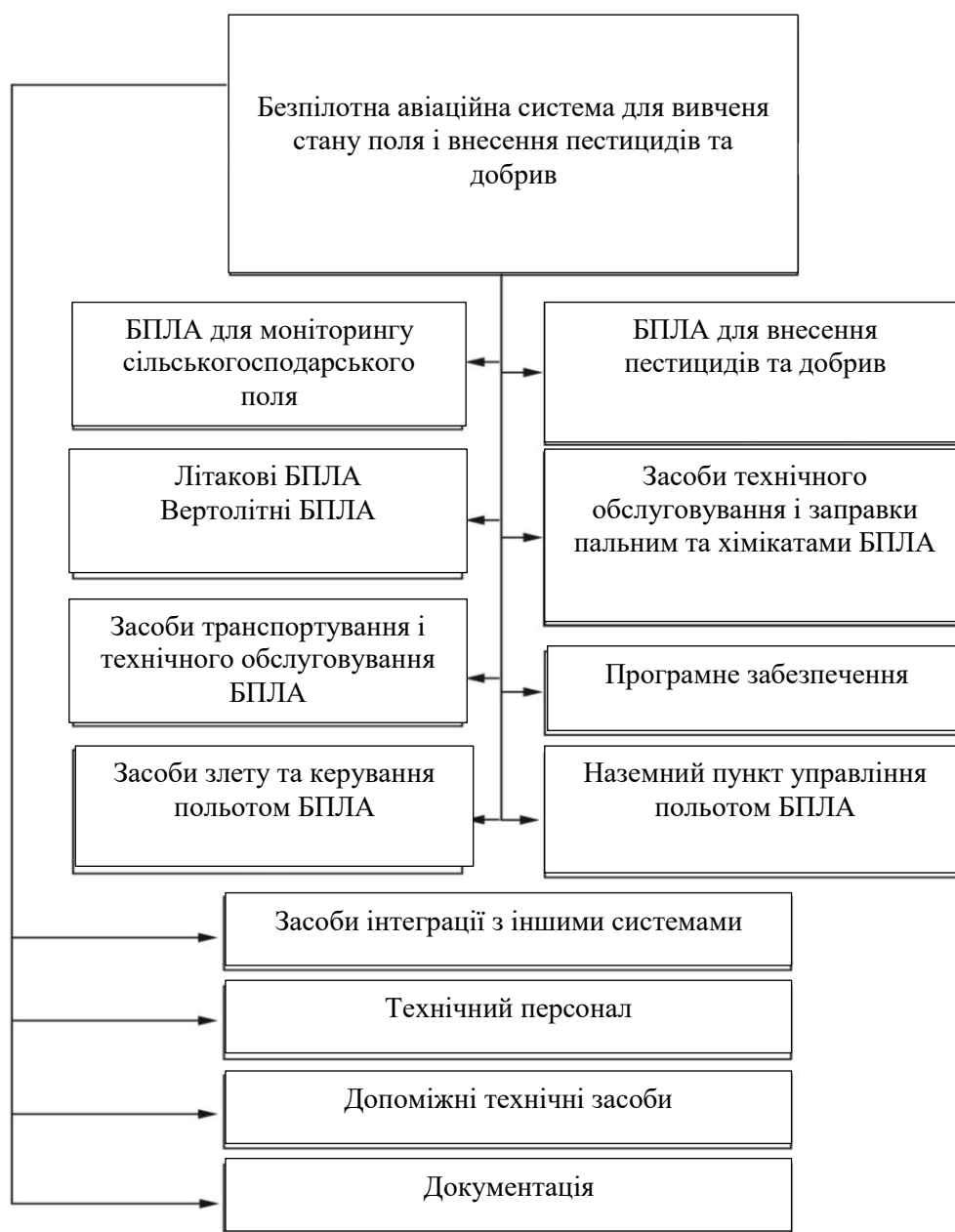


Рис. 1.6. Блок-схема безпілотної авіасистеми для внесення добрив і пестицидів

За оцінками консалтингової компанії *J'son & Partners Consulting* основну частину безпілотних літальних апаратів сільськогосподарського призначення на світовому ринку займають мультикоптери – 56% і дрони літакового типу 39% (рис.1.7). При цьому до 69% БПЛА використовують для моніторингу сільськогосподарських угідь і біля 24% застосовують для внесення захисту рослин і добрив.



а



б

Рис. 1.7. Типи БПЛА: а – літакового типу (крило); б – вертолітного типу (мультикоптер)

БПЛА зі сталим крилом (літакового типу) складаються з жорсткого крила, яке має заданий аеродинамічний профіль. Політ забезпечується за допомогою пропелера, який приводиться в рух двигуном внутрішнього згоряння або електродвигуном. Такі БПЛА здатні переносити значну корисну навантаження на великі відстані при менших витратах потужності. Недоліком є необхідність наявності злітно-посадкової смуги або пускової установки для зльоту та посадки. Ці апарати потребують руху повітря по своїх крилах для створення підйомної сили, тому вони не придатні для виконання стаціонарних робіт. Під час польоту втрачається візуальний контакт із БПЛА, що ускладнює процес керування і в деяких країнах законодавчо заборонено.

БПЛА з обертним крилом складаються з однієї або кількох лопатей (найчастіше чотирьох), які обертаються навколо нерухомої осі. При цьому

постійний рух апарата вперед для створення повітряного потоку над лопатями не потрібен — самі лопаті перебувають у безперервному русі, генеруючи необхідний потік повітря для підйомної сили. Керування такими БПЛА здійснюється зміною тяги та крутного моменту двигунів. Наприклад, опускання апарата створюється задніми двигунами, що розвивають більшу тягу, ніж передні, що дозволяє задній частині БПЛА підніматися вище, формуючи необхідний кут нахилу. Для повороту використовується крутний момент діагональних двигунів, що створює дисбаланс і змушує БПЛА обертатися навколо вертикальної осі. Найбільша перевага таких апаратів — можливість вертикального зльоту та посадки.

Широкого поширення для моніторингу сільськогосподарських угідь набув квадрокоптер Phantom 4 Pro (рисунок 1.8).

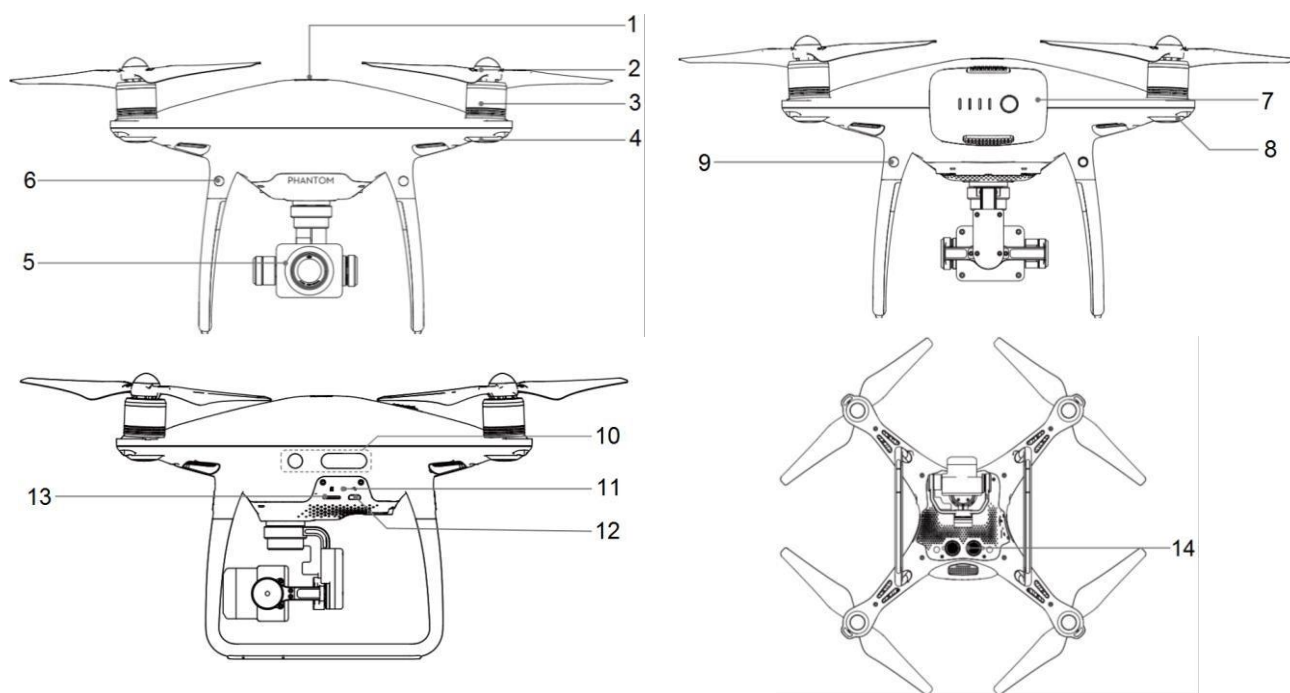


Рис. 1.8. Будова квадрокоптера Phantom 4 Pro: 1 – GPS; 2 – пропелери; 3 – мотори; 4 – передні світлодіодні індикатори; 5 – підвіс і камера; 6 – передня оптична система; 7 – акумуляторна батарея; 8 – індикатор; 9 – задня оптична система; 10 – інфрачервона система виявлення перешкод; 11 – індикатор камери (статусу прив'язки і кнопка прив'язки); 12 – роз'єм micro-USB; 13 – слот для карти пам'яті micro-SD камери; 14 – нижня оптична система

Керування дроном здійснюється з пульта дистанційного управління (рисунок 1.9). Антени 1 передають і приймають радіосигнал. Ручка управління 3 регулює напрямок польоту і швидкість руху дрона.

Для повернення в точку злету оператором натискається і утримується кнопка 4.

Індикатор стану 6 відображає статус системи пульта управління.

Кнопка живлення 7 використовується для увімкнення і вимкнення пульта.

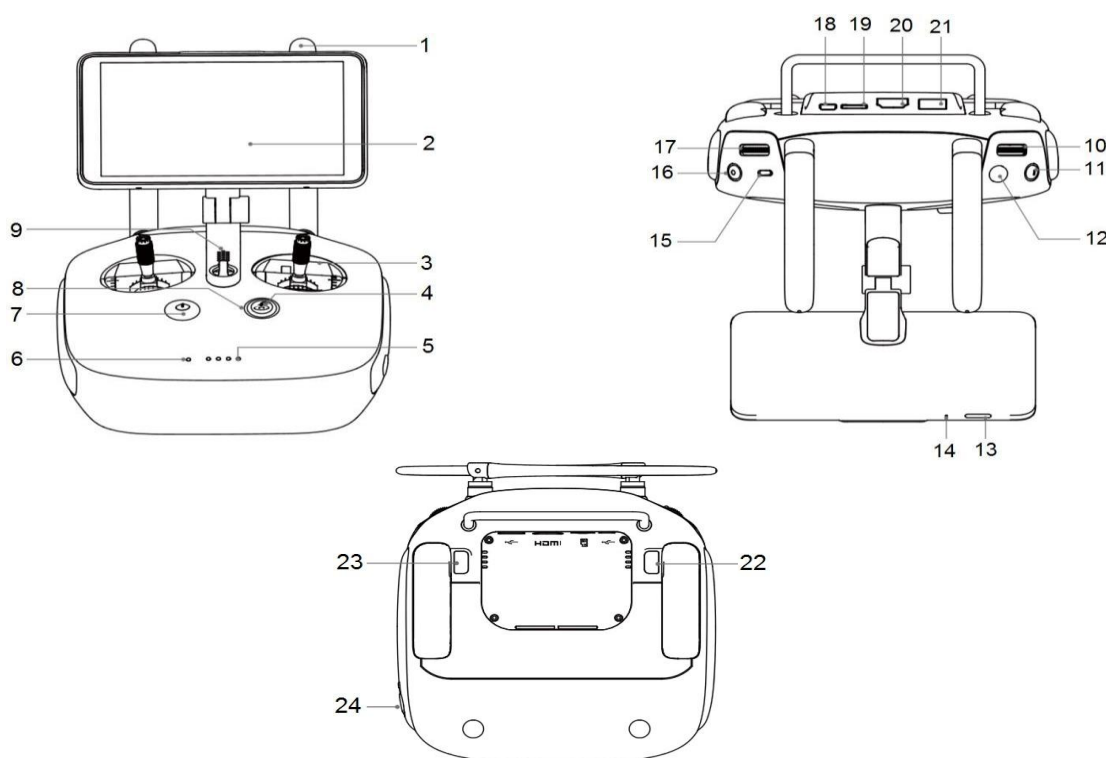


Рис. 1.9. Органи управління пульта дистанційного управління: 1 – антени; 2 – екран; 3 – ручка управління; 4 – кнопка повернення в точку злету; 5 – індикатори заряду батареї; 6 – індикатор стану; 7 – кнопка живлення; 8 – індикатор функції повернення в точку злету; 9 – динамік (аудіовихід); 10 – регулятор налаштувань камери; 11 – пауза інтелектуального польоту; 12 – кнопка спуску засувки фотокамери; 13 – кнопка режиму очікування; 14 – мікрофон; 15 – перемикач політних режимів; 16 – кнопка відеозапису; 17 – регулятор підвісу; 18 – роз’єм micro-USB; 19 – слот для карти micro-SD; 20 – роз’єм HDMI; 21 – роз’єм USB; 22 – кнопка C1; 23 – кнопка C2; 24 – роз’єм живлення

1.4 Карти-завдання для хімічного обробітку полів. Методи створення та способи використання

Сучасне землеробство активно впроваджує технології точного землеробства, одним із ключових елементів яких є карти-завдання для хімічного обробітку полів. Ці карти дозволяють диференційовано вносити добрива, засоби захисту рослин та інші агрохімічні препарати, оптимізуючи витрати ресурсів та зменшуючи негативний вплив на довкілля. Використання карт-завдань сприяє підвищенню ефективності виробництва сільськогосподарської продукції та дозволяє інтегрувати інформаційні технології у сільськогосподарське виробництво.

Карти-завдання для хімічного обробітку полів — це цифрові інструменти точного землеробства, що візуалізують дані про стан ґрунту та культури, дозволяючи створювати диференційні норми внесення добрив, ЗЗР (засобів захисту рослин) та інших хімікатів, а використовуються вони для оптимізації витрат, підвищення врожайності та екологічної безпеки через GPS-навігацію обприскувачів та аналіз даних для прийняття рішень. Створюються вони шляхом поєднання даних із дронів (мультиспектральних/гіперспектральних), супутників, сенсорів, профілювання ґрунту, а використовуються для генерації карт-завдань для техніки, що працює за принципом

Розглянемо основні методи створення карт-завдань для хімічного обробітку полів, а також способи їх використання у практичній діяльності фермерських господарств.

Карта-завдання — це цифровий документ, який містить просторово розподілену інформацію про необхідні норми внесення агрохімікатів у різних зонах поля. Створення таких карт вимагає спеціалізованого програмного забезпечення ([Farm Management Software](#)), GPS-обладнання на техніці та кваліфікованих фахівців.

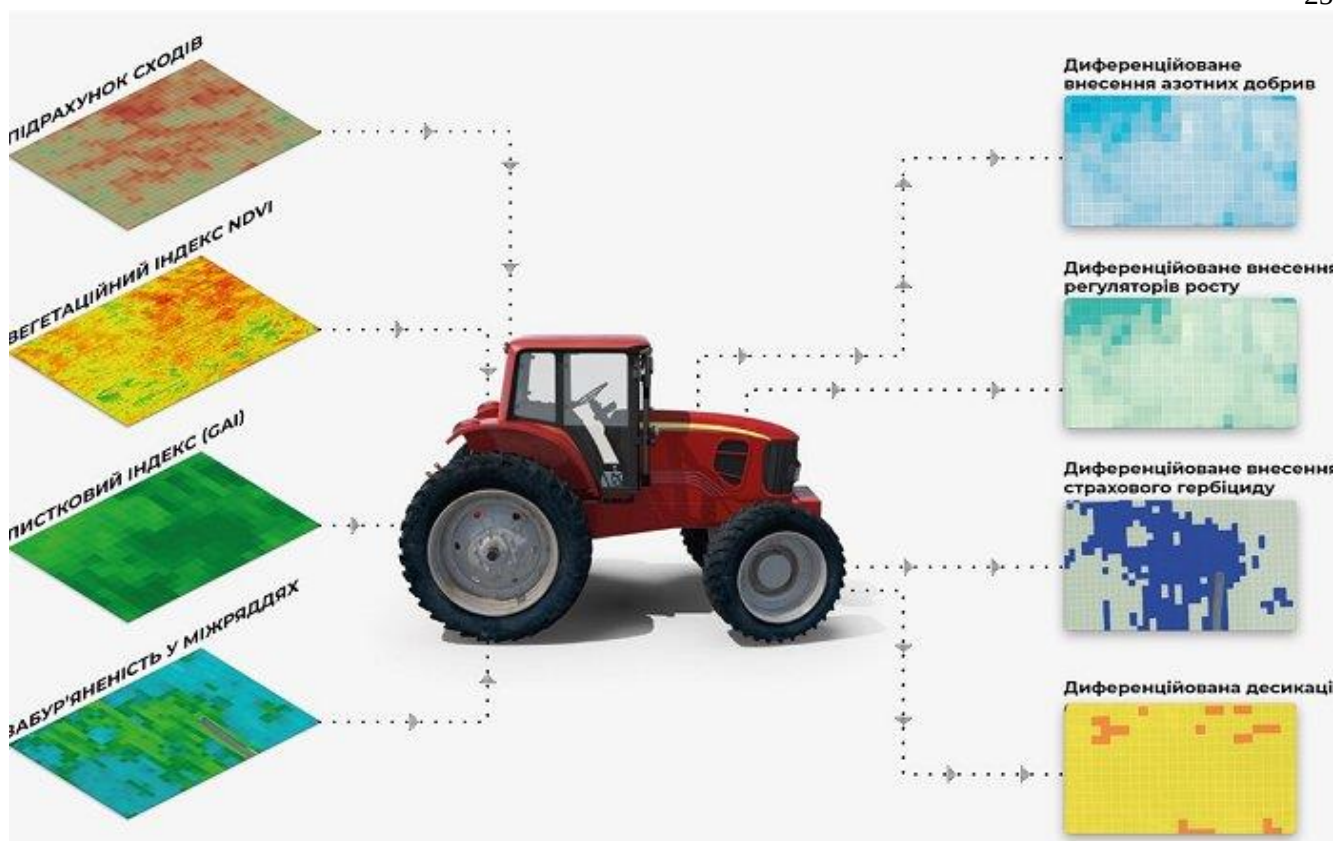


Рис.1.10. Зміст карт-завдань

Основні завдання цього виду геоінформаційних продуктів настуупні:

1. **Оптимізація витрат добрив і пестицидів.** Внесення речовин відповідно до потреб окремих ділянок поля дозволяє зменшити надлишкові витрати.
2. **Підвищення урожайності.** Точне забезпечення рослин необхідними елементами живлення підвищує продуктивність культури.
3. **Захист довкілля.** Диференційований підхід зменшує ризик забруднення ґрунтових вод та навколишнього середовища.
4. **Контроль агротехнологічних процесів.** Карти дозволяють вести облік внесених препаратів та оцінювати ефективність застосованих технологій.

Карта-завдання є основою для автоматизованих систем точного внесення, які використовують GPS-навігацію та системи управління технікою.

Методи створення карт-завдань

1. **Дистанційне зондування:**

- **Дрони (БПЛА) та супутники:** Збір даних за допомогою мультиспектральних камер (індекси типу NDVI, [NDRE](#)), що показують вегетаційну біомасу та здоров'я рослин, виявляючи зони стресу.

- **Аерофотознімання:** Створення ортофотопланів, що дозволяють візуалізувати неоднорідність поля.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє отримувати мультиспектральні та гіперспектральні зображення полів. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, Pix4D, Agisoft Metashape) можна отримати карти рослинності та визначити зональну продуктивність поля.

Переваги:

- висока точність виявлення стресових зон;
- можливість моніторингу великих площ;
- інтеграція з іншими агрометеорологічними даними.

Недоліки:

- потреба у високоякісних датчиках;
- залежність від погодних умов та освітленості.

2. Натурні дослідження Ґрунтів (Картування ґрунту):

- **GPS-профілювання:** Відбір проб ґрунту, визначення його властивостей (рН, вміст NPK, гумус, електропровідність), створення ґрунтових карт.

Цей метод передбачає проведення польових аналізів ґрунту та рослин для визначення рівня поживних речовин. Інформація обробляється у GIS-системах для створення карт-завдань.

Етапи створення:

1. Відбір проб ґрунту в різних точках поля;
2. Лабораторне визначення показників: рН, вміст макро- та мікроелементів, органічної речовини;
3. Просторовий аналіз даних та побудова карти-завдання.

Переваги: висока точність; можливість врахування локальних особливостей ґрунту.

Недоліки: трудомісткість і вартість польових досліджень.

3. Сенсорні технології:

- **Датчики на техніці:** Використання датчиків хлорофілу (наприклад, GreenSeeker), що в реальному часі оцінюють стан посівів під час руху трактора.
- **Карти врожайності:** Аналіз даних із комбайнів (оснащених GPS) для визначення продуктивності різних ділянок поля.

4. GIS-Платформи:

- Інтеграція всіх даних (ґрунтові, вегетаційні, урожайності) в Geographic Information Systems (GIS), де відбувається їх аналіз та формування карт зон управління (management zones).

4. Використання агрономічних моделей

Сучасні моделі (наприклад, DSSAT, APSIM) дозволяють прогнозувати потреби рослин у добривах та засобах захисту на основі історичних даних про урожайність, кліматичні умови та тип ґрунту. Карти-завдання (приписи) формуються автоматично, а норми внесення коригуються залежно від агрономічного прогнозу.

Переваги:

- можливість інтеграції різномірних даних;
- автоматизація процесу;
- планування на кілька сезонів вперед.

Способи використання карт-завдань

- **Диференційне внесення (VRA - Variable Rate Application):** Створення карт-завдань для обприскувачів та сівалок, які автоматично регулюють

норму внесення добрив, пестицидів, насіння, гербіцидів залежно від зони на полі (наприклад, більше азоту там, де низький NDVI).

- **Управління поливом та іригацією:** Використання карт вологості ґрунту для точного поливу.
- **Виявлення та боротьба зі шкідниками/хворобами:** Точне визначення осередків ураження для точкового обприскування, а не всього поля.
- **Аналітика та планування:** Оцінка ефективності агротехнічних заходів, прогнозування врожаю, прийняття обґрунтованих рішень на наступні сезони.

Переваги

- **Економія:** Зменшення витрат на хімікати та добрива (до 15-30%).
- **Підвищення врожайності:** Оптимальне живлення рослин у кожній точці.
- **Екологічність:** Зниження хімічного навантаження на довкілля.

Автоматизоване внесення хімікатів

Сучасна сільськогосподарська техніка оснащена системами управління, які дозволяють виконувати внесення агрохімікатів відповідно до карти-завдання. Це включає:

- диференційоване внесення добрив (Variable Rate Fertilization, VRF);
- диференційоване внесення пестицидів;
- автоматичну корекцію швидкості та норми внесення залежно від зони поля.

Завершальний етап – це завантаження карти-завдання в бортовий термінал розкидача або обприскувача, які оснащені необхідним обладнанням для внесення добрив або засобів захисту рослин диференційовано.

ISOBUS – формат обміну даними, створений для сільськогосподарської техніки, який всі сучасні машини і обладнання, як правило, або підтримують, або переформатовують «під себе» автоматично.

Завдання можна вивантажити на знімний накопичувач або флешку і підключити до бортового комп'ютера техніки за диференційованим внесення.

Моніторинг та контроль ефективності

Карти-завдання використовуються не лише для внесення хімікатів, але й для оцінки ефективності агротехнології. В результаті можна виявляти ділянки з низьким приростом врожаю або перенасиченням поживними речовинами.

Інтеграція з системами управління господарством

Карти-завдання інтегруються у системи Farm Management Information System (FMIS), що дозволяє вести облік робіт, витрат та врожайності. Це забезпечує комплексний підхід до точного землеробства та економічну ефективність.

Переваги та обмеження використання карт-завдань

Переваги:

1. Підвищення точності внесення добрив та засобів захисту рослин.
2. Зменшення витрат на агрохімікати.
3. Зменшення впливу на довкілля.
4. Можливість ведення цифрового обліку та аналітики.

Обмеження:

- необхідність високоякісного обладнання та програмного забезпечення;
- потреба у кваліфікованих кадрах;
- початкові витрати на впровадження технології;
- залежність від точності даних ДЗЗ та польових вимірювань.

Таким чином, карти-завдання для хімічного обробітку полів є невід'ємною складовою сучасного точного землеробства. Вони дозволяють оптимізувати використання агрохімікатів, підвищувати ефективність виробництва та знижувати

негативний вплив на довкілля. Методи створення карт включають використання даних дистанційного зондування, польових вимірювань та агрономічних моделей.

Ефективне використання карт-завдань передбачає інтеграцію з автоматизованими системами внесення, моніторинг результатів та комплексне управління господарством. Незважаючи на певні обмеження, переваги впровадження таких технологій роблять їх перспективними для сучасного аграрного виробництва.

Розділ 2. Технологія дистанційного виявлення бур'янів за матеріалами аерознімання з безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

2.1. Типові рішення для виконання аерознімання полів з метою виявлення бур'янів

Нижче подано розгорнутий опис порядку аерознімання полів з БПЛА для виявлення бур'янів. Текст структуровано як фрагмент наукової статті або розділу дипломної роботи з розгорнутими поясненнями, технічними деталями та методологічними уточненнями.

1. Вступні положення та загальні принципи аерознімання для моніторингу бур'янності

Аерознімання сільськогосподарських угідь з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стало ключовою складовою сучасних технологій точного землеробства, оскільки забезпечує високу просторову деталізацію та оперативність отримання даних щодо стану посівів. Для виявлення бур'янів застосовуються оптичні сенсори різних типів — RGB-камери, мультиспектральні та гіперспектральні системи, які дозволяють реєструвати спектральні ознаки рослинного покриву та виділяти елементи, що морфологічно або спектрально відрізняються від культурних рослин. Ефективність і точність такого моніторингу значною мірою залежить від правильно організованої методики аерознімання: вибору апаратури, висоти польоту, перекриття, сезонності та фаз вегетації культур, якості калібрування сенсорів та погодних умов під час польоту.

Виявлення бур'янів у посівах потребує особливої точності, оскільки більшість видів бур'янової рослинності мають невеликі розміри, часто маскуються серед культурних рослин і можуть бути ідентифіковані лише за рахунок комбінації просторових (розмір листків, форма) [11] та спектральних ознак (відмінності у відбитті в ближньому інфрачервоному, «red edge» та зеленому діапазонах). Тому порядок аерознімання повинен забезпечувати такий рівень деталізації, який дозволяє формувати спектральні індекси, ортофотоплани та цифрові моделі,

придатні для автоматизованої класифікації з використанням алгоритмів машинного навчання.

2. Підготовчий етап аерознімання

Обстеження поля та визначення агротехнічного контексту. Перед виконанням польової зйомки проводиться попередній аналіз агротехнічних умов [9,10]:

- тип культури,
- строк сівби,
- фази вегетації,
- очікувана структура міжрядь,
- наявність попередніх даних щодо бур'яності,
- планування подальшої обробки (гербіцидів, механічного контролю).

Зокрема, визначається оптимальний момент знімання. Для виявлення бур'янів важливо, щоб:

1. бур'яни вже перебували на стадії 2–6 листків або вище;
2. культурні рослини ще не закрили міжряддя, що дозволяє бачити ґрунт і рослини різних типів;
3. спектральні відмінності між культурою та бур'янами були мінімально знівельовані та не накладалися одна на одну.

Вибір типу БПЛА і сенсорного навантаження

Тип БПЛА визначається розмірами поля, бажаною реляційною роздільною здатністю та тривалістю польотів.

Квадрокоптери доцільні для:

- невеликих та середніх ділянок (до 150–200 га),
- отримання надвисокої роздільної здатності (1–2 см/рх),
- детальних оглядів окремих зон.

Крилаті БПЛА (fixed-wing) використовуються для:

- великих площ понад 200–300 га,
- оптимального покриття за короткий час,

- роздільної здатності 3–5 см/рх (достатньо для карт бур'яності).

Типи сенсорів:

- *RGB-камери* — базовий варіант для побудови ортофотопланів високої деталізації й морфологічного аналізу рослин.
- *Мультиспектральні камери (Red, Green, Blue, Red Edge, NIR)* — основний інструмент для спектральної ідентифікації бур'янів.
- *Гіперспектральні сенсори (цілі спектральні куби)* — найбільш точні, але дорогі; використовуються для досліджень та спеціалізованих задач.

Планування польотного завдання. План польоту розраховується у спеціалізованому ПЗ (Pix4D, DJI Pilot, UGCS). Порядок аерознімання полів з БПЛА для виявлення бур'янів є складним технологічним процесом, який включає низку етапів — від планування польоту до багатоступеневого фотограмметричного та аналітичного опрацювання отриманих знімків. Висока точність і деталізація результатів забезпечуються завдяки правильно підібраним параметрам знімання, якісному калібруванню сенсорів і застосуванню сучасних методів спектрального аналізу та класифікації. Отримані дані є основою для прийняття управлінських рішень у системах точного землеробства, зокрема для оптимізації обсягів внесення гербіцидів, зниження витрат і мінімізації впливу на довкілля.

Таблиця. 2.1. Рекомендовані параметри планування та виконання польоту БПЛА для картування бур'янів

Група параметрів	Параметр	Рекомендоване значення / діапазон	Обґрунтування / вплив на якість даних
1. Загальні параметри місії	Тип БПЛА	Крило / мультикоптер (залежно від площі)	Мультикоптер — висока деталізація на малих площах; крило — велика продуктивність.
	Площа поля	10–500 га	Визначає вибір

Група параметрів	Параметр	Рекомендоване значення / діапазон	Обґрунтування / вплив на якість даних
			БПЛА, час місії, кількість маршрутів.
	Час доби	10:00–15:00 (сонячно, без тіней)	Обмеження тіней мінімізує помилки спектрального аналізу.
	Погодні умови	Вітер < 5–7 м/с; хмарність < 20%	Гарантує стабільність польоту та рівномірне освітлення.
2. Параметри сенсорів	Тип камери	RGB (20–48 Мп), мультиспектральна (Red, Green, Blue, RedEdge, NIR)	Для бур'янів критичним є аналіз хлорофілу та стресових індексів.
	Фокусна відстань	24–35 мм	Оптимальний баланс між охопленням та деталізацією.
	Роздільність сенсора	≥ 1” або мультиспектральні матриці	Підвищує якість ортофотоплану та спектральних індексів.
3. Геометрія зйомки	Висота польоту	40–120 м	На 40–60 м — оптимальна для точного виявлення бур'янів.
	GSD (розмір пікселя на місцевості)	1.5–3.0 см/пікс	Висока деталізація необхідна для розділення рослин.
	Перекриття поздовжнє	75–85%	Покращує реконструкцію 3D

Група параметрів	Параметр	Рекомендоване значення / діапазон	Обґрунтування / вплив на якість даних
			та текстур.
	Перекриття поперечне	65–80%	Зменшує "дірки" в ортофотоплані та покращує вегетаційні карти.
	Кут камери	Надавальний (90°)	Найкращий варіант для картографування рослинності та сегментації.
4. Параметри маршруту	Швидкість польоту	3–7 м/с	Зменшує розмиття кадрів і підвищує різкість.
	Модуль польоту	“Lawnmower” / “Grid”	Рівномірне покриття площі, необхідне для ортомозаїки.
	Розташування контрольних точок (GCP)	5–15 точок на поле	Підвищує точність ортофотоплану до <5 см.
	РКТ (RTK/PPK)	Рекомендовано	Дозволяє досягнути високої точності навіть без GCP.
5. Технічні параметри БПЛА	Ємність акумулятора	4500–10000 mAh	Визначає тривалість польоту.
	Тривалість польоту	20–90 хв	Залежно від конструкції (квадрокоптер / крило).
	Максимальний радіус дії	1–5 км	Залежно від вимог місії та законодавства.

Група параметрів	Параметр	Рекомендоване значення / діапазон	Обґрунтування / вплив на якість даних
6. Спектральні параметри (для мультиспектральних камер)	Довжини хвиль	Blue: 450±20 nm; Green: 560±20 nm; Red: 650±20 nm; RedEdge: 725±10 nm; NIR: 840±20 nm	Критично важливо для виявлення стресу рослин та побудови індексів NDVI, GNDVI, NDRE.
	Коефіцієнт експозиції	Авто / ручний (стала експозиція)	Запобігає появі артефактів у спектральних індексах.
7. Параметри обробки	Тип ортомозаїки	True Ortho / Agri-Ortho	Забезпечує точну геометрію рослинного покриву.
	Алгоритм сегментації	Thresholding, SVM, Random Forest, U-Net	Дозволяє відокремити бур'яни від культурних рослин.
	Генерація NDVI / NDRE	Обов'язково	Підсилює контраст між здоровими культурами та бур'янами.
	Формат експорту	GeoTIFF 16-bit	Для GIS-аналізу та машинного навчання.
8. Додаткові параметри безпеки та контролю	Система повернення додому	Автоматична	Забезпечує безпеку при втраті зв'язку.
	Контроль заряду батареї	Авто, автоматичне зниження висоти	Мінімізує ризики аварії.
	Дотримання законодавства	Повідомлення / мітинг-політ	Залежно від країни та місцевих правил використання

Група параметрів	Параметр	Рекомендоване значення / діапазон	Обґрунтування / вплив на якість даних
			БПЛА.

Додатково закладаються наземні контрольні точки (GCP) з GNSS-RTK/PPK обробкою для підвищення геометричної точності ортофотоплану, що особливо важливо при подальшому векторному картуванні бур'янистих плям.

3. Процедура проведення аерознімання

3.1. Перевірка технічного стану обладнання

Перед стартом здійснюється:

- калібрування IMU та компаса,
- перевірка стану акумуляторів,
- форматування карт пам'яті,
- перевірка чистоти лінз сенсорів,
- тестове знімання еталонної панелі (для мультиспектральних камер).

3.2. Виконання польоту за маршрутом

Під час польоту оператор стежить за:

- стабільністю сигналу GPS,
- рівнем освітлення,
- виконанням перекриття,
- відсутністю пропусків кадрів (dropped frames),
- коректною фіксацією метаданих EXIF.

Для мультиспектральних систем виконується додаткова реєстрація даних сенсора освітлення (Sunshine Sensor), що дозволяє компенсувати зміни інсоляції.

3.3. Використання калібраційних панелей

До та після польоту проводиться фотознімання калібраційної панелі із відомими коефіцієнтами відбиття. Це забезпечує:

- коректне нормування спектральних каналів,
- правильне обчислення індексів (NDVI, VARI, NDRE тощо),
- можливість зведення даних, отриманих у різні дні.

4. Первинне опрацювання матеріалів аерознімання

4.1. Створення набору вхідних даних

До ПЗ (Pix4Dmapper, Agisoft Metashape, DJI Terra) імпортуються:

- фотознімки RGB або мультиспектральні канали,
- наземні контрольні точки (якщо використовуються),
- дані телеметрії БПЛА.

4.2. Фотограмметрична обробка

Основні етапи включають:

1. **Вирівнювання та орієнтування знімків** — визначення позицій камер, побудова sparse-cloud.
2. **Генерація щільної хмари точок** — створення структурно точного 3D-моделювання поверхні.
3. **Побудова цифрової моделі місцевості (ЦМР) або поверхні (ЦМП)** — залежно від задачі.
4. **Формування ортофотоплану** — ключового продукту для картування бур'яності.
5. **Калібрування спектральних каналів** — для мультиспектральних даних.

Отриманий ортофотоплан повинен мати роздільну здатність, достатню для розрізнення окремих рослин або груп бур'янів — зазвичай 1–5 см/рх.

5. Аналітичний етап: виявлення бур'янів на ортофотопланах

5.1. Попередня обробка зображень

Включає:

- фільтрацію шумів,
- радіометричну нормалізацію,

- корекцію освітлення,
- побудову карт спектральних індексів (NDVI, GNDVI, NDRE, VARI, OSAVI).

Для бур'янів добре працюють індекси, чутливі до: зеленого спектра (G-band), red-edge, NIR (для широколистих бур'янів та великої вегетативної маси).

5.2. Сегментація рослинності та виділення бур'янових плям

Методи залежать від типу даних:

1. Для **RGB-зображень**: морфологічні операції, кластеризація (k-means, MeanShift), алгоритми глибинного навчання (U-Net, Mask R-CNN).
2. Для **мультиспектральних знімків**: аналіз спектральних сигнатур, побудова шкали NDVI/NDRE для культурної рослинності, виділення аномальних зон з іншими спектральними ознаками.
3. **Геостатистичний аналіз**: локальна візуалізація «плям» (рослинних угруповань) бур'янів, визначення їх площі, кореляція з рослинністю і ґрунтом у міжряддях.

5.3. Формування карт бур'яновості

На основі класифікації створюються тематичні карти [20,21,22]:

- карта щільності бур'янів,
- карта типів бур'янів (якщо модель дозволяє класифікацію видів),
- карта зон диференційованого внесення гербіцидів, побудована з врахування нормативної витрати конкретного препарату на одиницю площі,
- векторні контури бур'янових плям, сумісні з форматом shapefile або ISOXML.

Ці карти інтегруються в системи точного землеробства (Trimble, John Deere Operations Center, AgLeader, Raven) для формування карт-завдань на внесення препаратів.

2.2. Характеристики знімальної апаратури.

З 2010 року спостерігається постійний технологічний прогрес в інтеграції безпілотників з економічно ефективними технологіями дистанційного зондування, такими як цифрові камери, здатні отримувати зображення у видимому, ближньому інфрачервоному (NIR) і теплових областях спектру, а також точне глобальне супутникове позиціонування (GPS) а також технології глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). У той же час на ринку зростає доступність комерційних продуктів за низькими цінами, готових і простих у використанні для користувачів з дуже обмеженими технологічними ноу-хау. Ці фактори сприяли широкому впровадженню БПЛА в сільському господарстві. Широке використання різних типів датчиків для моніторингу вегетації культур призвело до розробки кількох комерційних рішень для багатоспектральних систем візуалізації на основі БПЛА. Камери RGB і CIR високої роздільної здатності (модифікований RGB-камери, здатні знімати зелений, червоний і ближній діапазони, також можуть бути використані для отримання спектральних даних, якщо вони спектрально та радіометрично охарактеризовані. Однак, основними обмеженнями є невелике перекриття між спектральними каналами, які як правило, не відповідають смугам, які спочатку використовувалися в стандартних видимих зонах, низька радіометрична роздільна здатність і стабільність.

Найважливішими характеристиками знімальної апаратури і формованого нею зображення є:

- просторова роздільна здатність (ПРЗ);
- радіометричний дозвіл (РД);
- спектральний дозвіл (СД);
- часовий дозвіл (ТД).

Основними геометричними характеристиками зображень, одержуваних із розташованих на різних платформах сенсорів, є просторове розрізнення (ПРЗ) і ширина смуги огляду. ПРЗ визначає лінійні розміри мінімально реєстрованого елемента (пікселя) зображення, тобто мінімальні лінійні величини зображення

об'єкта місцевості, зафіксовані пікселем. Ширина смуги огляду залежить від довжини хвилі випромінювання, що сприймається за λ , висоти орбіти космічних апаратів H , діаметра об'єктива D .

$$R = \frac{w \cdot H}{f} \quad (2.1)$$

де: w - лінійний розмір датчика; H - висота орбіти; f - фокусна відстань об'єктива оптичної системи.

Об'єкти, менші розміру пікселя можуть бути виділені на зображенні, якщо вони контрастують з фоном. З іншого боку, об'єкти, порівнянні за розміром з пікселем або більші, не можуть бути виділені, якщо поруч знаходяться більш яскраві або домінуючі об'єкти. Низька ПРЗ не завжди є недоліком. Такі системи, зазвичай, характеризуються широкою смугою огляду, безперервністю збору інформації й малим часовим циклом повторної зйомки. Знімки низької ПРЗ значно дешевші, тому для моніторингу великих територій їх використання може бути більш доречним і привабливим.

Ширина смуги огляду залежить від висоти розташування супутника і максимального відхилення променя «зору» камери від напрямку в надир. Як правило, чим ширша смуга огляду, тим нижча просторова роздільна здатність.

Радіометричний дозвіл (РД) цифрових знімків дистанційного зондування визначається шириною динамічного діапазону датчика, що використовується, тобто кількістю рівнів дискретизації, відповідних переходу від яскравості абсолютно чорного до абсолютно білого кольорів. РД вказується числом біт. РД = 8 біт відповідає 256 рівнів градації яскравості. Для виявлення елементарного об'єкта повинна виконуватися умова:

$$\frac{I_{об} \cdot S}{R^2} > \Delta I, \quad (2.2)$$

де: $I_{об}$ - яскравість об'єкта; S - його площа; R - просторова роздільна здатність; ΔI - радіометричний дозвіл.

Спектральний дозвіл відповідає кількості діапазонів електромагнітного спектру і розмірам зон зйомки, що реєструються знімальною апаратурою. Залежно від кількості спектральних діапазонів, у яких реєструється зображення, знімальна апаратура і, відповідно, одержувані з її допомогою космічні знімки поділяються на:

- монохроматичні (монозональні, інтегральні або панхроматичні);
- мультиспектральні (від 2 до 10 реєстрованих діапазонів);
- гіперспектральні (може бути більше 100 зон).

Панхроматичні знімки використовують одну більш-менш широку зону видимого спектра і зазвичай мають більш високу ПРЗ. Багатозональні включають кілька зональних знімків, одночасно реєструються в різних вузьких ділянках електромагнітного спектру. Необхідна кількість діапазонів забезпечується застосуванням фільтрів, призм, дифракційних решіток. Гіперспектральні знімки використовують більш вузькі зони.

Мультиспектральні (багатозональні) знімки дозволяють ідентифікувати об'єкти з унікальними спектральними характеристиками, тому їх використання більш прийнятне, оскільки характерні особливості природних об'єктів різних класів найбільш чітко проявляються в різних ділянках електромагнітного спектра. При тематичних дослідженнях, зазвичай, вибирають той діапазон, який найбільш чітко відокремлює досліджуваний об'єкт. Для відображення багатозональних знімків використовують різні комбінації зон, що підкреслюють ті чи інші особливості об'єктів. Оскільки такі зображення, передусім, призначені для візуалізації на екрані дисплея в палітрі RGB, комбінації будують з використанням трьох зон, порядок яких відповідає червоному, зеленому і синьому кольоровим каналами монітора, а процес називають **синтезом**. Зазвичай використовують три стандартних комбінації зон:

- червона, зелена і синя зони створюють композицію **істинного кольору**, в якій об'єкти виглядають так як вони сприймалися б неозброєним оком людиною;

- ближня ІЧ, червона і зелена зони створюють композицію *помилкового, фальшивого кольору*;
- середня ІЧ, ближня ІЧ і зелена зони створюють композицію *псевдокольору*, який дозволяє підкреслити кольором відмінності об'єктів, що зручно для візуального дешифрування знімків.

Часовий дозвіл (ЧД) визначає як часто датчик отримує зображення певної області на поверхні Землі. ТД є важливим при вивченні і виявленні змін поверхні і залежить від висоти знімання, ширини смуги огляду, кількості літальних платформ, що одночасно знаходяться в польоті. Наприклад супутникові знімальні системи: Landsat має ТД 16 днів, SPOT – 1 день, NOAA – кілька годин. Окремі космічні системи оснащені спеціальними пристроями, що дозволяють відхиляти апаратуру ДЗЗ від напрямку в надир і проводити бічну зйомку під кутом до траси прольоту. В результаті можна не лише скоротити періодичність повторної зйомки заданого району земної поверхні, але й розширити сумарну смугу огляду.

На ринку представлені як комплексні рішення (БПЛА з інтегрованою камерою), так і окремі модулі для встановлення на різні літаючі платформи.

За твердженням сайту *agroportal.ua*, найбільш популярними мультиспектральними камерами для застосуванні на безпілотноїках не лише в Україні, а й за кордоном є Micasense RedEdge-M, SLANTRANGE і Parrot SEQUOIA.

- **MicaSense RedEdge (наприклад, Dual)** - популярний вибір для встановлення на різні польотні платформи, такі як DJI Matrice 300 RTK. Має високу продуктивність в польових умовах при моніторингу урожаю.
- **Parrot Sequoia+**. Мультиспектральна камера, призначена для встановлення на БПЛА і широко застосовується для картографування рослинності.
- **Серія FigSpec® FS-50**. Нове покоління мультиспектральних камер від компанії Color Spectrum Technology, спеціально адаптованих для платформ **DJI M350/M300RTK**. Працює в широкому діапазоні довжин хвиль від 400 нм до 1000 нм.

- **SlantRange 4P** – вдосконалений модуль, який складається з повноцінного RGB-об'єктива і 6 спектральних смуг. Дозволяє складати карти щільності рослин, вмісту хлорофілу й інших показників, а також встановлювати стороннє програмне забезпечення.

Марка камери	 Micasense RedEdge-M	 SLANTRANGE 3p	 Parrot SEQUOIA
Спектральний діапазон, нм	400-900	410-950	550-790
Сенсор освітлення	-	1	-
Кількість спектральних полос	5	4	4
Вага, г	170	350	135
Формати зйомки	JPG, RAW	KLM, SHP, Geo TIFF	JPEG, RAW, Geo TIFF
Продукт камери:	Red Edge NDVI, NDVI	CNDVI, RNDVI, Red Edge NDVI	NDVI, NIR, NDRE
Розмір зображення в одному пікселі, см	12	13	13
Обсяг пам'яті, Сб	32	64	64
Програмне забезпечення	Mission Planner, Pix4d, Drone Deploy	SlantView	Airinov, Pix4d, Drone Deploy

Рис.2..1. Характеристики мультиспектральних камер для БПЛА

Комплексні рішення (БПЛА з RGB та мультиспектральною камерою):

- **DJI Mavic 3 Multispectral** - це спеціалізований дрон, оснащений інтегрованою мультиспектральною камерою, який випускається з 2022 року. Вважається кращим завдяки своїй портативності і простоті застосування.

- **DJI Phantom 4 RTK** –визнаний експертами кращим дроном для геодезії і картографії. Відрізняється високою точністю даних при використанні невеликої кількості наземних точок.

Розділ 3. Отримання та опрацювання матеріалів аерознімання з БПЛА з метою створення карт-завдань для внесення гербіцидів

3.1. Підготовка безпілотного літального апарата до аерознімання поля

1. Після виймання БПЛА з захисного кофру встановлюють і перевіряють рівень заряду акумуляторних батарей (рисунок 3.1).



Рис. 3.1 Акумуляторна батарея: встановлення та перевірка рівня заряду

2. Від'єднуємо фіксатор камери на підвісі карданного типу (рисунок 3.2). Далі приєднуємо гвинти у відповідності до їх кольорового маркування. По черзі гвинти встановлюють в пази осі електродвигуна з легким притисканням і прокручуванням на чверть оберта (сірі – по годинниковій стрілці, чорні – проти).



Рис. 3.2 Знімання фіксатора камери та приєднання гвинтів

3. Підготовка пульта управління полягає у розкритті антен та встановлення в спеціальному тримачі смартфона або планшетного комп'ютера. З'єднуємо USB кабелем смартфон і пульт управління (рисунок 3.3).



Рис. 3.3 Смартфон: встановлення і приєднання до пульта управління

3. Вмикаємо живлення БПЛА спочатку коротким і потім довгим натисканням. Повинна відбуватись перевірка фіксаторів підвісу камери та

надійності фіксації гвинтів. Також подвійними натисканнями вмикаємо живлення пульта управління.



Рис. 3.4 Вмикання БПЛА та пульта управління

4. Для повної перевірки всіх систем БПЛА скористаємось попередньо встановленою на смартфоні програмою **DJI**. Після її запуску виберемо тип коптера зі списку **DJI Phantom 4 Pro** і запусниться тестування дрона



Рис. 3.5 тестування систем дрона програмою DJI

5. Для запуску БПЛА зводимо дві ручки управління по діагоналі вниз.



Рис. 3.6. Запуск БПЛА

6. Вимикаємо додаток DJI.

Перейдемо до підготовки польотного завдання для безпілотного літального апарата. (БПЛА і пульт управління повинні бути увімкнутими).

1. Запускаємо на смартфоні (чи планшеті) попередньо встановлену програму **Pix4DCapture**.

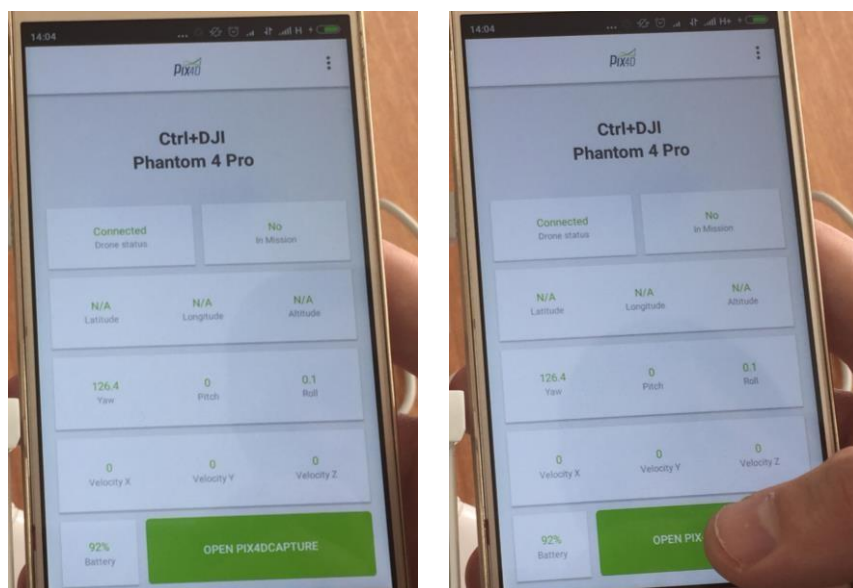


Рис. 3.7. Запуск програми Pix4DCapture

2. Програма автоматично повинна визначити властивості приєднаного коптера. Далі переходимо у вікно польотного завдання і командою **OPEN**

Pix4Dcapture вибираємо варіант здійснення польоту: **GRID MISSION**



Рис. 3.8. Вибір і запуск варіанта польотного завдання

Система визначає місцеположення дрона. Слід вибрати графічно межі зони знімання, висоту польоту (керуючись бажаним розрізненням знімків), перекриття знімків, швидкість польоту БПЛА, кут нахилу камери. Після налаштування вибираємо команду **START**.



Рис. 3.9. Налаштування умов польоту та вибір команди **START**

Програма завантажує польотне завдання в автопілом дрона, після чого відбувається його виконання.



Рис. 3.10. Завантаження польотного завдання в автопілот дрона

3.2. Методика створення карти завдання для хімічного обробітку за картами вегетаційних індексів

Вхідними даними є матеріали аерознімання поля господарства ТОВ [«Липівка-Агро»](#) (Тулчинський район, Вінницька область, с. Липівка вул. Набережна 95) з

просапними овочевими культурами. Аерознімання виконане у квітні 2023 року, отримано 87 мультиспектральних зображень отриманих з дрона Mavic 3 Multispectral. Дрон оснащено 20-мегапіксельною RGB-камерою та 4-х однодіапазонними 5-мегапіксельними спектральними датчиками які фіксують зображення в таких зонах спектру: (Зелений 560 ± 16 nm; Червоний 650 ± 16 nm; Червоний край 730 ± 16 nm; Близький інфрачервоний 860 ± 26 nm).

Mavic 3 Multispectral оснащений модулем RTK, що дозволяє досягати високої точності геоприв'язки аерознімків порядку 2-3см.

Технологічний процес опрацювання аерознімків програмою Pix4DFields передбачає виконання таких етапів.

Етап 1. Отримання аерознімків. Отримання знімків за допомогою будь-якої стандартної RGB-камери або мультиспектральної камери, такої як Parrot Sequoia+ чи MicaSense RedEdge. Для планування польоту дрона рекомендується використовувати додаток Pix4Dcapture.

Етап 2. Створення блоків аерознімків та геодезичне забезпечення місцевості.

Етап 3. Створення моделей місцевості, ортофотопланів та індексних карт полів.

Етап 4. Візуалізація та комплексний аналіз цифрових моделей місцевості (поля), ортофотопланів та індексних карт. Аналіз посівів, польових операцій, створення карт-завдань.

Етап 5. Експорт аналітичних документів у виробничі інформаційні системи.

На основі зображень БПЛА відбувається класифікація бур'янів за вегетаційним індексом рослинності та створюють як остаточний продукт карту завдань в виді шейп-файлів, сумісних із багатьма типами тракторних терміналів, таких як траєкторні дисплеї для тракторної техніки різних виробників (наприклад John Deere Greenstar) та для дронів-оприскувачів.

Створення проекту в програмному середовищі в PIX4Dfields - додано 87 RGB

зображень, які покривають територію площею 26,7га.



Рис.3.11. Зображення центрів проекцій аерознімків в програмі PIX4Dfields

В автоматичному процесі фотограмметричного опрацювання створюються цифрова модель рельєфу та ортофотоплан (рис.3.12). Після цього створюють карту індексу рослинності VARI, щоб виділити бур'яни/рослинність на полях. У PIX4Dfields обираємо цей індекс рослинності на панелі Генератор Індексу. Це індекс, який підкреслює зелену рослинність і розраховується за формулою [23]:

$$VARI = (G - R)(G + R - B) \quad (3.1)$$

де R , G , B – значення пікселів знімка у відповідних спектральних каналах R (червоний), G (зелений), B (синій).

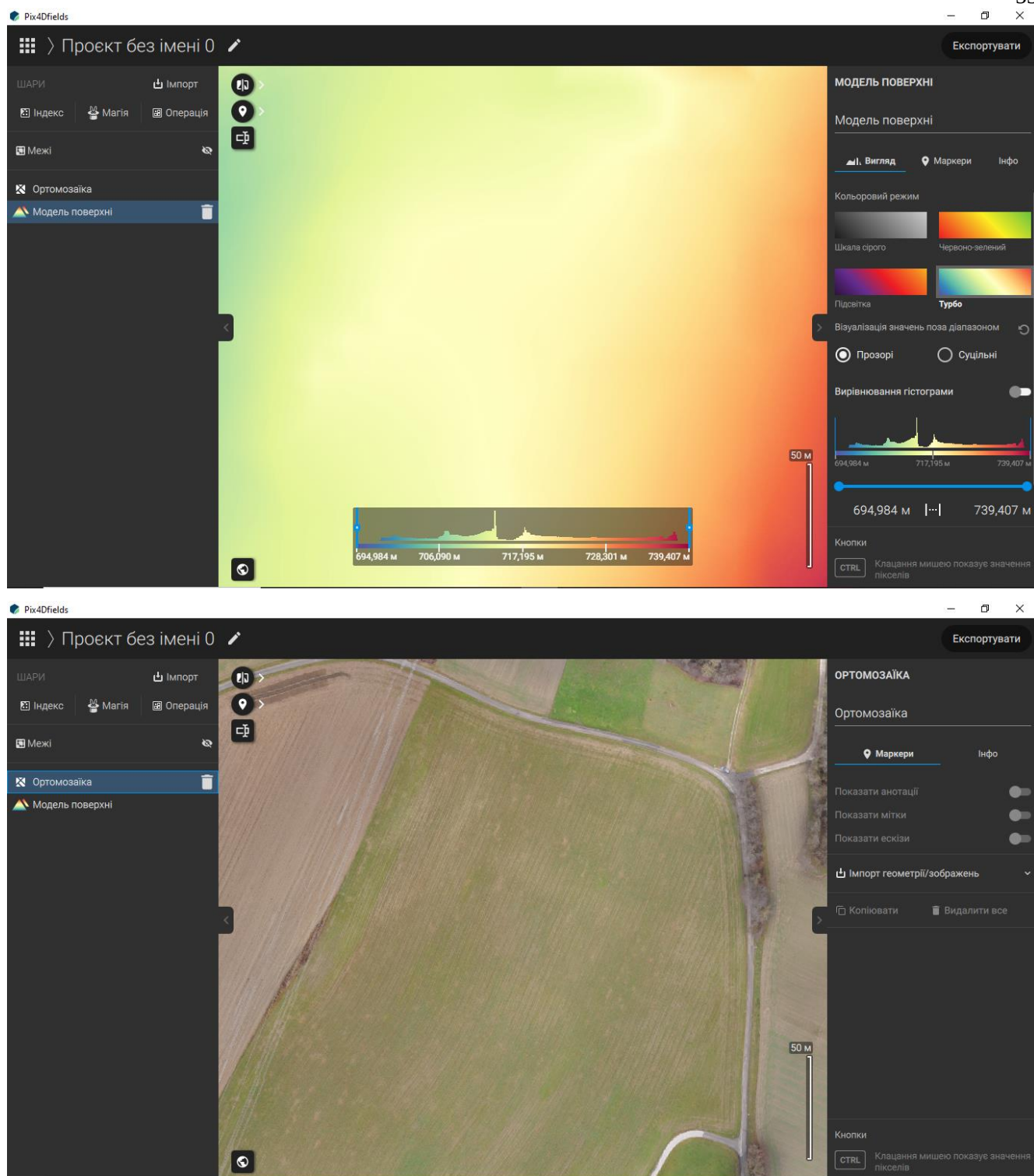


Рис.3.12. ЦМР та ортофотоплан, створені при опрацюванні проекту в програмі PIX4Dfields



Рис.3.13. Карта вегетаційного індексу VARI

Виявлення забур'янених ділянок на карті вегетаційного індексу VARI виконуємо шляхом підбору діапазону значень за гистограмою. Ми ідентифікуємо всі бур'яни в числовому діапазоні значень індексу: $-0,02 \leq \text{VARI} \leq 1,0$, як показано на рисунку 3.14.

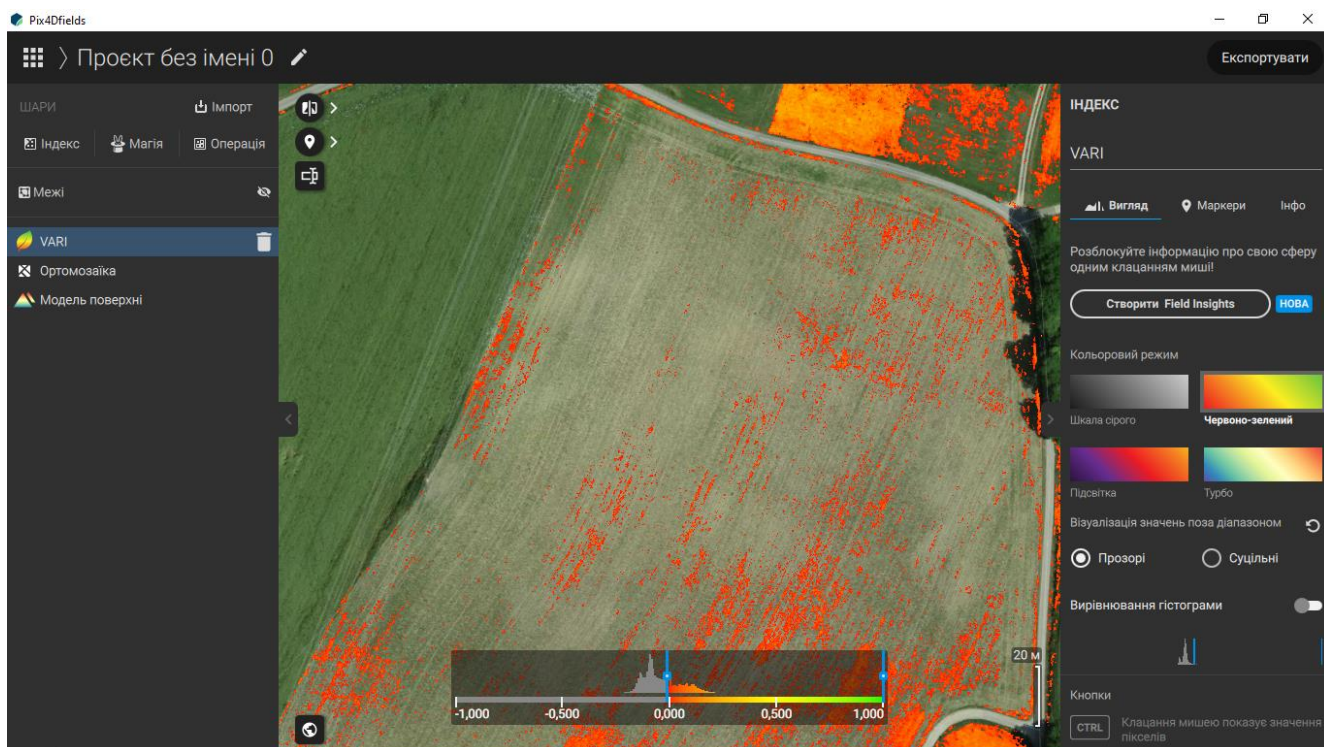


Рис.3.14. Результат ідентифікації бур'янів на карті вегетаційного індексу VARI

Встановимо межу поля для створення карти-завдання (карти приписів) на обробіток дронами-оприскувачами та наземними аплікаторами засобами захисту рослин, регуляторами росту та гербіцидами. На ділянці також є перешкоди для руху техніки – це опора лінії електропередач та дерева на узбіччі дороги. Такі перешкоди теж оконтурюємо по ортофотоплану. Перешкоди будуть зазначені непрохідними ділянками для обприскувачів-дронів та тракторів. Правильне визначення та вибір перешкод має вирішальний вплив на траєкторію руху обприскувачів, щоб уникнути аварій.

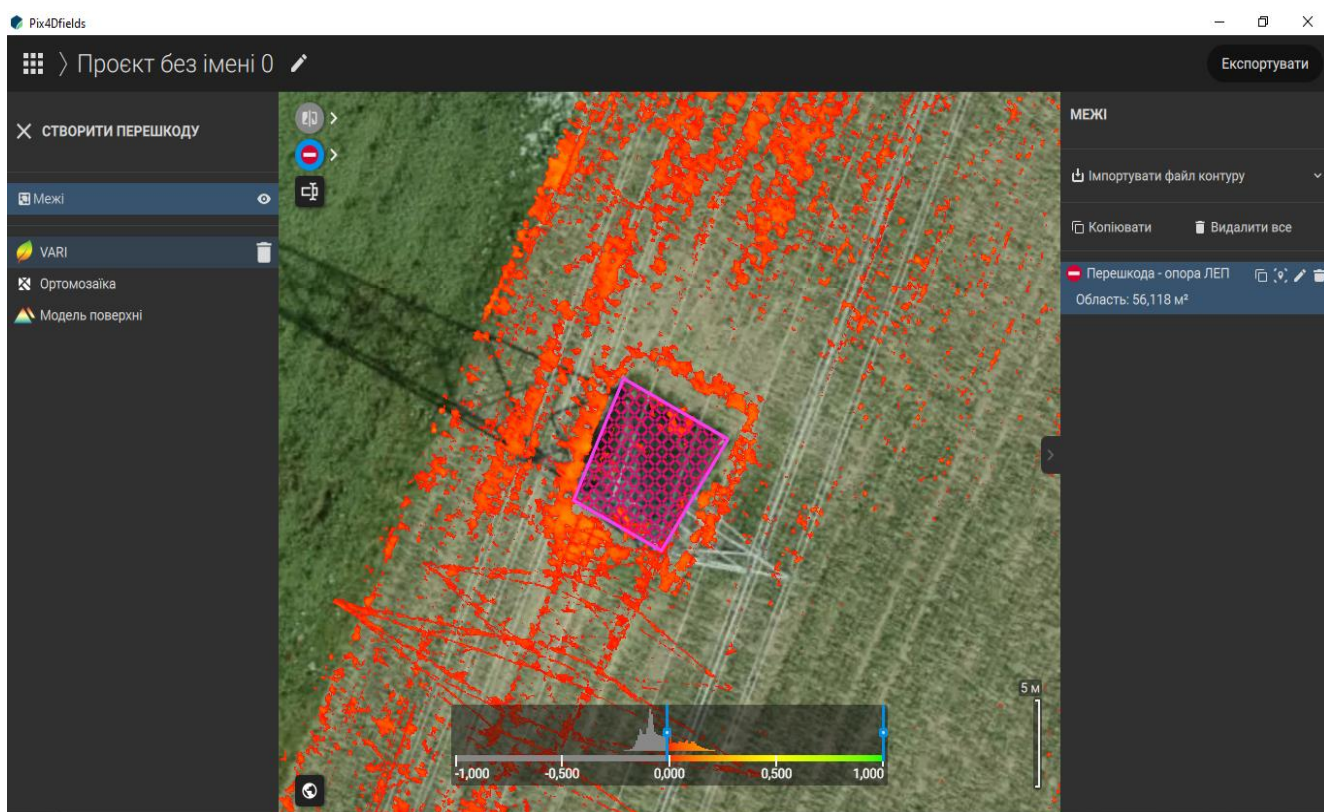
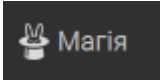


Рис.3.15. Результат оконтурення меж поля та позначення перешкод для руху техніки

Щоб отримати доступ до інструменту створення карти-завдання натиснемо значок «Операція» на лівій бічній панелі PIX4Dfields. Далі за допомогою

інструмента  «Magia» створюємо сітку пікселів для карти-завдання.

Спосіб створення сітки виберемо опцію «Зонування» (попереднє заповнення сітки індексним шаром). При цьому врахуємо, що розмір комірки має відповідати зоні захоплення самохідним чи причіпним оприскувачем складає (2,5м), а напрямок комірок – співпадати з бажаним напрямком рухом оприскувача вздовж довгої сторони поля.

Мінімальний розмір комірки сітки MagicTool залежить від просторового розрізнення ортофотоплану.



Рис.3.16. Розбиття сітки комірок 2,5х2,5м в межах досліджуваного поля

Для створення карти-завдання (припису) вказуються параметри нормативного розходу обраного хімічного препарату (наприклад 240 літрів/га). Карта приписів може бути експортована в окремий файл і готова до використання на тракторному терміналі чи самохідному роботизованому оприскувальному агрегаті.

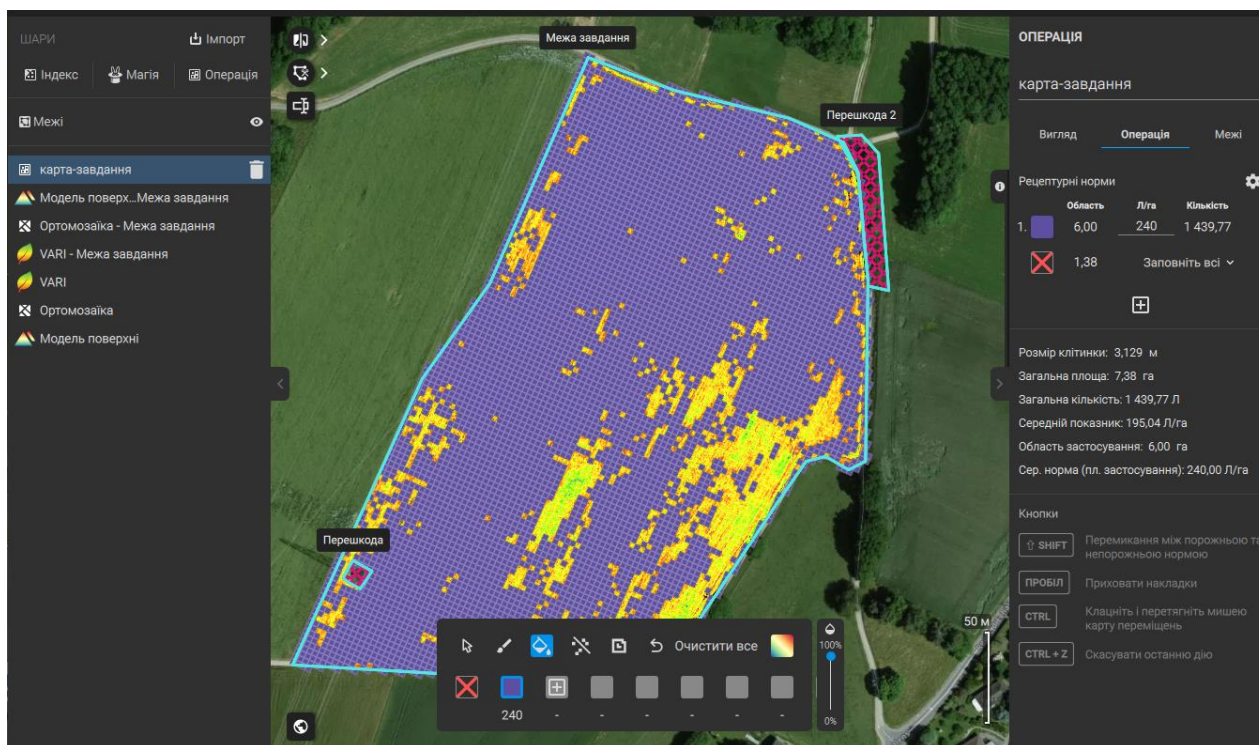


Рис.3.17. Створена карта-завдання (припис) для використання на тракторному терміналі чи самохідному роботизованому оприскувальному агрегаті

Під час формування карти-завдання для застосування дрона-оприскувача доцільно встановлювати мінімальний розмір елементарної комірки сітки (1×1 м), а також визначати порогове значення частки пікселів, що перевищують заданий рівень вегетаційного індексу. У проведеному дослідженні граничний поріг було встановлено на рівні 25,3%. Це означає, що обробці підлягають лише ті комірки площею 1 м^2 , у межах яких площа пікселів з індексом, що перевищує критичне значення, становить понад $0,16 \text{ м}^2$ (25,3%). Такий підхід забезпечує високоточне формування карти-завдання та мінімізує надлишкове внесення хімічних препаратів.

Усі пікселі, що продемонстрували позитивний результат ідентифікації бур'янів на основі карти вегетаційного індексу VARI відповідно до умови (3.1), були класифіковані на три градації методом рівних інтервалів. Для кожної з отриманих зон визначаються відповідні норми витрати хімічного засобу (у літрах), що дозволяє диференціювати інтенсивність обробки залежно від рівня забур'яненості.

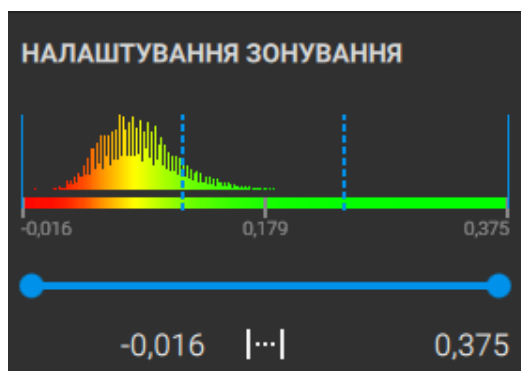
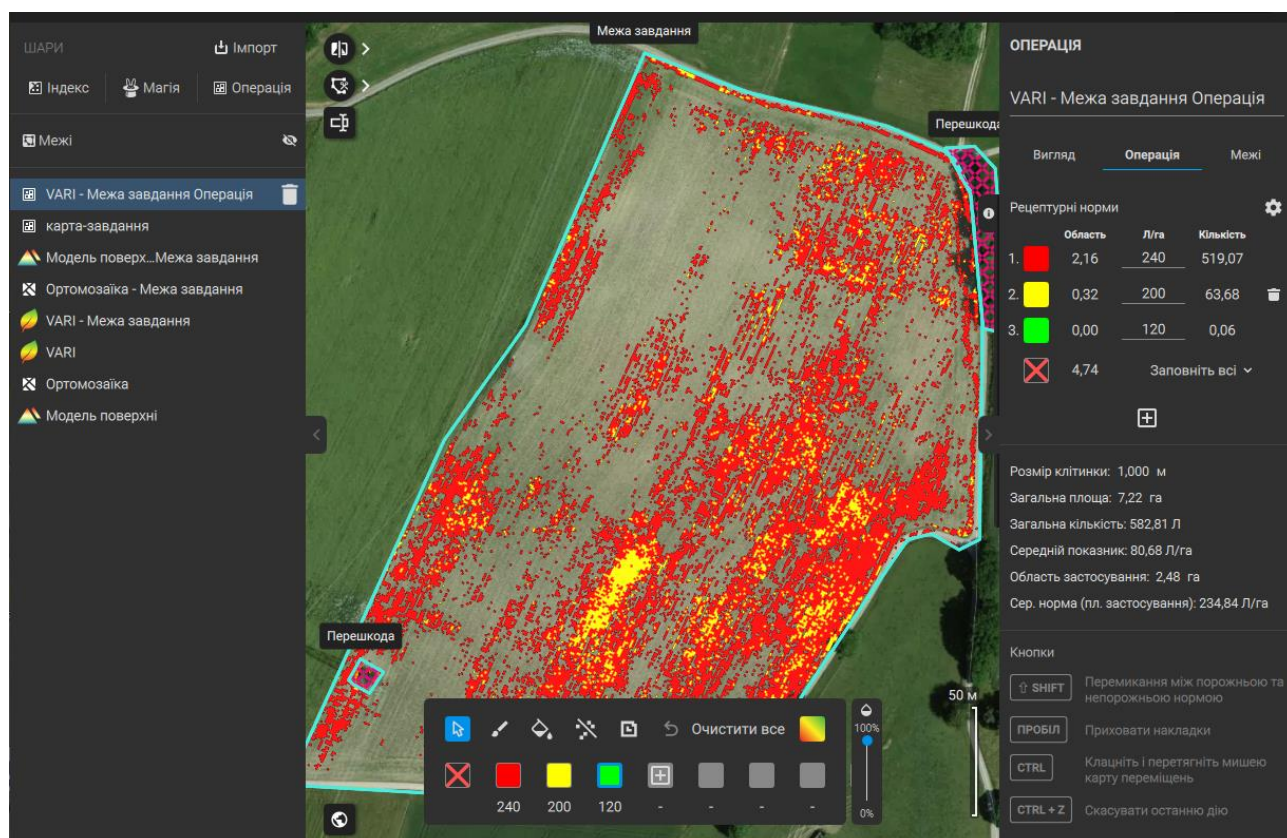


Рис.3.18. Карта-завдання (притис) для використання на дроні-оприскувачі

Розділ 4. Охорона довколишнього середовища

Програми моніторингу навколишнього середовища використовують мультиспектральні зображення для відстеження змін рослинності, контролю якості води та оцінки стану екосистеми з часом. Професійний аналіз навколишнього середовища вимагає спектральних діапазонів, які виявляють умови навколишнього середовища та зміни, які візуальний огляд не може виявити [5].

Лісове господарство використовує мультиспектральні дані для оцінки стану лісів, ідентифікації видів дерев та моніторингу змін у лісах, включаючи спалахи хвороб та нашествия комах. Професійний лісівничий аналіз вимагає спектральної інформації, яка розрізняє здорову та стресову рослинність.

У гірничодобувній промисловості та геології використовуються багатоспектральні зображення для визначення складу мінералів, відстеження впливу на навколишнє середовище та моніторингу відновлювальних робіт. Професійний геологічний аналіз вимагає спектральних діапазонів, які розкривають характеристики мінералів та умови навколишнього середовища.

Моніторинг навколишнього середовища на будівельному майданчику поєднує документацію RGB про хід будівництва з багатоспектральним аналізом впливу на навколишнє середовище, включаючи моніторинг стресу рослинності та ерозії. Професійний інтегрований моніторинг забезпечує комплексний нагляд за проектом та перевірку відповідності екологічним вимогам.

Програми міського планування поєднують RGB-зображення для документації інфраструктури з мультиспектральним аналізом міських теплових островів, стану рослинності та стану навколишнього середовища. Професійний міський аналіз інтегрує візуальну документацію з кількісною оцінкою навколишнього середовища.

Археологічні дослідження поєднують RGB-зображення для детальної документації особливостей з мультиспектральним аналізом, який виявляє підземні особливості та ґрунтові умови. Професійний археологічний аналіз використовує як

візуальну документацію, так і спектральний аналіз для комплексної оцінки ділянки.

Реагування на надзвичайні ситуації поєднує RGB-зображення для негайної оцінки збитків з мультиспектральним аналізом впливу на навколишнє середовище та виявленням небезпек. Професійний аналіз надзвичайних ситуацій вимагає як негайної візуальної оцінки, так і детального моніторингу навколишнього середовища.

Впровадження технології точного землеробства забезпечує отримання позитивного екологічного ефекту за рахунок диференційованого застосування хімічних засобів захисту рослин на окремо взятих полях з урахуванням їх диференціації за родючістю ґрунтів та іншим умовам росту і розвитку рослин. При цьому досягається економія часу і матеріально-технічних ресурсів за рахунок більш раціонального їх використання і позитивний екологічний ефект. Однак його кількісна оцінка затруднена внаслідок об'єктивних причин, зокрема:

- комплексний характер міроприємств з впровадження технології точного землеробства і його впливу на агроєкосистеми утруднюють визначення рівня екологічної ефективності (зниження затрат засобів виробництва – палива, добрива, засоби захисту рослин тощо);

- екологічна обумовленість технології точного землеробства ландшафтними і кліматичними умовами надає можливість узагальнення результатів, отриманих в ході проведення дослідної роботи з точного землеробства і використання їх в інших регіонах зі схожими агроєкологічними умовами;

- позитивні екологічні ефекти від впровадження технологій точного землеробства визначаються особливостями їхнього застосування на практиці. Однак вони поки не отримали широкого поширення і доволі важко отримати конкретні дані про реальний масштаб, що підтверджує їх ефективність.

Традиційні схеми внесення мінеральних добрив та засобів захисту рослин передбачають рівномірне розподілення поживних речовин по всій площі поля без урахування просторової мінливості ґрунтів, рельєфу, вологості, густоти рослин та фактичного рівня забезпеченості елементами живлення. Такий підхід історично був

зумовлений обмеженими можливостями точних вимірювань і слабкою доступністю геопросторових даних, проте він не здатний враховувати реальні потреби культур у різних зонах поля. У результаті надмірне внесення в ґрунт на одних ділянках поєднується з дефіцитом у інших, що призводить до перевитрати ресурсів, зниження ефективності добрив та збільшення ризику забруднення довкілля азотними сполуками, фосфатами та продуктами їх перетворення.

Натомість технології диференційованого внесення (Variable Rate Application, VRA), що базуються на даних дистанційного зондування, GPS-навігації, картах урожайності та моделях просторової мінливості, дозволяють застосовувати добрива у відповідності до конкретних потреб окремих ділянок. Використання карт-рекомендацій, створених на основі аерознімків з БПЛА, супутникових індексів вегетації, ґрунтових аналізів чи електропровідності ґрунтів, гарантує значно точніше управління живленням рослин. Такий підхід забезпечує підвищення врожайності за рахунок більш збалансованого живлення та суттєво зменшує перевитрати добрив, що позитивно впливає на економічну ефективність виробництва.

З екологічної точки зору диференційоване внесення є одним із ключових інструментів мінімізації антропогенного навантаження на агроландшафти. Завдяки зниженню надлишкового внесення азоту та фосфору скорочуються обсяги їхнього вимивання у ґрунтові та поверхневі води, що зменшує ризики евтрофікації водойм і забруднення нітратами. Локалізоване застосування, врахування рельєфних депресій і територій з потенційними ризиками стоку дозволяють оптимізувати розподіл добрив таким чином, щоб мінімізувати втрати та запобігти деградаційним процесам. У комплексі це формує більш екологічно збалансовану модель агровиробництва, де підвищення продуктивності поєднується з відповідальним ставленням до природних ресурсів.

Крім того, отримання екологічного ефекту залежить від рівня інтенсифікації ведення господарства - чим він вище, тим більш значним є екологічний ефект від використання технологій точного землеробства – результат оцінки екологічного

ефекта точного землеробства в значній степені залежить від вибору технологій або систем господарювання, з якими порівнюють технології точного землеробства. Водночас очевидно, що зазначені ефекти відрізняються і в кількісному вимірі залежно від рівня інтенсифікації та екологізації агротехнологій, обраних для порівняння. У науковій літературі екологічні ефекти від застосування технологій точного землеробства зазвичай визначаються шляхом порівняння диференційованого обробітку окремо взятого поля з традиційними суцільними обробітками без урахування просторових відмінностей родючості, але за однакового рівня прикладених технологічних зусиль.

Зниження інтенсивності обробітку ґрунту з урахуванням диференціації глибини в межах окремого поля насамперед забезпечує можливість скорочення витрат пального. Екологічний ефект від застосування диференційованої технології сівби залежно від просторової неоднорідності поля загалом, імовірно, є нижчим порівняно з диференційованим обробітком ґрунту, а його кількісна оцінка є значно складнішою.

У результаті забезпечується економія насіннєвого матеріалу, мінеральних добрив і засобів захисту рослин, а також зменшується потреба в посівних площах. Очевидно, що екологічний потенціал цього елемента технологій точного землеробства є відносно невисоким. Водночас диференційоване внесення добрив, безсумнівно, характеризується значно вищим позитивним екологічним ефектом. За умов зменшення норм витрат добрив унаслідок їх диференційованого внесення можна очікувати зниження сукупного негативного впливу на навколишнє природне середовище, як при їхньому виробництві, так і при внесенні. При цьому скорочується витратата невідновлюваних енергетичних ресурсів, а також внесення важких металів (урану, кадмію) що містяться в добривах у ґрунт. Кількісна оцінка зазначених ефектів є ускладненою. Крім того, у низці випадків упровадження технологій точного землеробства супроводжується збільшенням норм внесення добрив з метою підвищення економічної ефективності адаптивно-ландшафтного землеробства. Ефективне управління популяціями агроценозів

забезпечує зростання рівня їх саморегуляції. Завдяки цьому застосування технологій точного землеробства відкриває додаткові можливості для управління резистентністю популяцій шкідливих організмів до засобів захисту рослин.

На практиці можливе впровадження розглянутих стратегій контролю бур'янів. Очевидно, що технології точного землеробства є ключовим інструментом для практичної реалізації заходів із охорони цінних агроландшафтів та забезпечення екологічної стабільності в межах окремого поля і суміжних біоценозів у контексті реалізації стратегій адаптивно-ландшафтного землеробства. У результаті відкриваються додаткові можливості для збереження рідкісних видів дикої флори і фауни. Реалізація на практиці екологічного потенціалу точного землеробства значною мірою залежить від вибору державної агротехнологічної політики та чинної нормативно-правової бази.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Виконаний в кваліфікаційній роботі аналіз дозволив встановити, що використання безпілотних літальних апаратів у поєднанні з алгоритмами просторово-спектрального аналізу, реалізованими в Pix4Dfields, забезпечує оперативне і високоточне картографування ділянок із підвищеною інтенсивністю росту бур'янів та створення карт припису для їх цільового оприскування.

Застосування індексів рослинності, зокрема VARI, дозволило виявити спектральні відмінності між культурними рослинами та бур'янами. Це підтверджує можливість застосування для знімання полів камер RGB, які є суттєво дешевшими за мультиспектральні фотокамери. Методика класифікації забур'янених зон на основі порогового аналізу дала змогу забезпечити оптимальну витрату гербіцидів, сприяє зменшенню перерозходу агрохімікатів та істотно знижує антропогенне навантаження на ґрунти та екосистеми. Визначення оптимальної площі комірки 1×1 м дозволило підвищити просторову деталізацію карти припису, що забезпечує умови досягнення високої точності роботи дрона-оприскувача.

Експериментальні результати підтвердили, що фотограмметричні продукти на основі аерознімків з БПЛА сприяють впровадженню технологій диференційованого внесення засобів захисту рослин. Це підвищує ефективність боротьби з бур'янами, забезпечує раціональне використання ресурсів та підвищує економічну рентабельність сільськогосподарського виробництва.

Програма Pix4Dfields є одним із провідних інструментів обробки аерофотознімків, отриманих з БПЛА, і дозволяє виконувати побудову ортофотопланів, карт індексів рослинності (NDVI, VARI, NDRE та ін.), класифікацію рослинного покриву, сегментацію територій та створення карт припису для диференційованого внесення добрив, засобів захисту рослин або регуляторів росту. Використання цих алгоритмів дає змогу точно визначати зони локального поширення бур'янів і адаптувати норми внесення гербіцидів відповідно

до інтенсивності забур'яненості. Такий підхід повністю відповідає концепції точного землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альперт С. (2020). Використання безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 27, 26–30.
2. Ачасов А.Б., Ачасова А.О., Тітенко Г.В., Селіверстов О.Ю., & Сєдов А.О. (2018). Методичні основи використання БПЛА для контролю забур'яненості посівів. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, № 3-4, 69–74. journals.uran.ua
3. Ачасов А.Б., Сєдов А.О. (2016). Оцінка забур'яненості посівів соняшника за допомогою безпілотних літальних апаратів // *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія: Екологія*, вип. 13, 13–18.
4. Ворох В., Зацерковний В. (2024). Використання безпілотних літальних апаратів в задачах прецизійного землеробства. *Технічні науки та технології*, 4(38), 336–349. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-336-349](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-336-349)
5. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту: монографія / Д.В. Бондар, А.В. Гурник, А.О. Литовченко, В.В. Хижняк, В.Л. Шевченко, Д.М. Ядченко. Київ, 2022, 312 с.
6. Зацерковний В., Ворох В. (2024). Технології ДЗЗ у прецизійному землеробстві. *Технічні науки та технології*, 2(36), 266–277. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2\(36\)-266-277](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-266-277) tst.stu.cn.ua
7. Савин І.Ю., Вернюк Ю.І. (2015). Можливості використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу продуктивності ґрунтів та забур'яненості. *Бюлетень Ґрунтознавчого інституту ім. В. В. Докучаєва*, № 80, 95–106.
8. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Наказ «Про затвердження технічних вимог до геопросторових даних, метаданих і геоінформаційних сервісів національної інфраструктури геопросторових даних» від 10.11.2021 № 347. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0021-22#Text>
9. Пасічник Н. А. (2020). Методика прогнозування обсягів врожаю на базі даних ДЗЗ високої просторової роздільної здатності з БПЛА. Збалансоване

природокористування, 2(2020). <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2020.208824>
journals.uran.ua

10. Практикум із землеробства: Навч. посібник / М.С. Кравченко, О.М. Царенко, Ю.Г. Міщенко та ін.; За ред. М.С. Кравченка і З.М. Томашівського. — К.: Мета, 2003. — 320 с.
11. Faigal B.S., Freitas H., Pedro H.G., Mano L.Y., Pessin G., Carvalho A.C. Krishnamachari B., Ueyama J. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. 138. 210-223.
12. Koç C. Design and Development of a Low-cost UAV for Pesticide Applications. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*. 2017. 34(1). 94-103.
13. Huang Y., Hoffmann W.C., Lan Y., Wu W., Fritz B.K. Development of a Spray System for an Unmanned Aerial Vehicle Platform. *Applied Engineering in Agriculture*. 2009. Vol. 25. N6. 803-809.
14. Kale S.D, Khandagale S.V., Gaikwad S.S., Narve S.S., Gangal P.V. Agriculture Drone for Spraying Fertilizer and Pesticides. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2015. Vol. 5. Iss.12.
15. Mogili U.R., Deepak B.B. Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Computer Science*. 2018. N133. 502-509.
16. Maes W.H., Steppe K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*. 2019. N24(2). 152-164.
17. Matese A., Di Gennaro S.F. Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticulture. *Scientific Reports*. 2021. N11. 2721.
18. Tamouridou A.A., Alexandridis T.K., Pantazi X.E., Lagopodi A.L., Kashefi J., Kasampalis D., Kontouris G., Moshou D. Application of Multilayer Perceptron with Automatic Relevance Determination on Weed Mapping Using UAV Multispectral Imagery. *Sensors*. 2017. N17. 2307.

19. Liu J., Xu W., Guo B., Zhou G., Zhu H. Accurate Mapping Method for UAV Photogrammetry Without Ground Control Points in the Map Projection Frame. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021. 1-9.
20. Zhang, R. F., Wang, C., Hu, X. P., Liu, Y. X., Chen, S., & Su, B. F. (2020). Weed location and recognition based on UAV imaging and deep learning. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 3(1), 23–29.
<https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20200301.63> [IJPAE](#)
21. Huang, Y., Reddy, K. N., Fletcher, R. S., & Pennington, D. (2018). UAV low-altitude remote sensing for precision weed management. *Weed Technology*, 32(2), 2–6.
<https://doi.org/10.1017/wet.2017.89> [ARS](#)
22. Weed detection based on deep learning from UAV imagery: a review. (2025). *Smart Agricultural Technology*, 12, Article 101147.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101147>
23. Wang L.H., Lan Y.B., Yue X.J., Ling K.J., Cen Z.Z., Cheng Z.Y. et al. Vision-based adaptive variable rate spraying approach for unmanned aerial vehicles. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019. 12(3). 18-26.
24. Wang, S., Han, Y., Chen, J., He, X., Zhang, Z., Liu, X., & Zhang, K. (2022). Weed density extraction based on few-shot learning through UAV remote sensing RGB and multispectral images in ecological irrigation area. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 735230. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.735230>
25. Weed Detection from Unmanned Aerial Vehicle Imagery Using Deep Learning - A Comparison between High-End and Low-Cost Multispectral Sensors. (2024). *Sensors*, 24(5), 1544. <https://doi.org/10.3390/s24051544>
26. Harnessing UAVs and deep learning for accurate grass weed detection in wheat fields: a study on biomass and yield implications. (2024). *Plant Methods*, 20, Article 144. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01272-6> [SpringerLink](#)