

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: **“ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ТА АЕРОЗНІМКІВ З БПЛА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПОШИРЕННЯ
ІНВАЗИВНИХ ВИДІВ РОСЛИННОСТІ
(НА ПРИКЛАДІ БОРЩІВНИКА СОСНОВСЬКОГО)”**

Виконав: студент гр. ЗВ-62

Спеціальності 193 Геозембудівництво та землеустрій

(шифр і назва)

В.І. Арендарук

(Прізвище та ініціали)

Керівник: професор, д.т.н. О.Є.Куліковська

(Прізвище та ініціали)

Рецензенти: _____

(Прізвище та ініціали)

Львів 2025

Застосування геоінформаційних технологій та аерознімків з БПЛА для контролю поширення інвазивних видів рослинності (на прикладі борщівника Сосновського). Арендарук Василь Іванович. Кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025, – 53 с. текстової частини, 3 таблиці, 16 рисунків, 28 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі розглядається методичні засади здійснення дистанційного моніторингу за ареалом поширення борщівника Сосновського – небезпечного інвазивного виду, який набуває поширення у Східній Європі. На основі аналізу літературних джерел та основних джерел даних дистанційного зондування окреслено структурні схеми двох масштабованих рівнів дистанційного моніторингу – на основі космічних багатоспектральних знімків та на основі багатоспектральних знімків з безпілотних літальних апаратів.

Виконано аналіз спектральних особливостей борщівника Сосновського, що дозволило визначити методику його дистанційної ідентифікації. Підтверджено, що поєднання мультиспектральних каналів, спектральних індексів (зокрема NDVI та спеціалізованих індексів), разом із алгоритмами геоінформаційного аналізу, забезпечує високу точність виділення інвазійних осередків. Зібрано набори вхідних даних, включаючи мультиспектральні аерофотознімки з БПЛА високої просторової роздільної здатності. Виконано фотограмметричну обробку аерознімків, у ході якої сформовано ортофотоплани, цифрову модель рельєфу та цифрову модель поверхні. Ці дані стали основою для просторової інтеграції та подальшого тематичного картографування інвазивної рослинності.

Розглянуті питання охорони довкілля.

Приведено висновки та рекомендації.

Ключові слова: моніторинг інвазивної рослинності, мультиспектральне знімання з БПЛА, аналіз карт вегетаційних індексів, ГІС.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Розділ 1. Теоретичні та правові засади здійснення моніторингу за інвазивною рослинністю	8
1.1. Борщівник Сосновського (Heracleum Sosnowskyi) - інвазивний вид рослинності у Львівській області та на суміжних територіях.....	8
1.2. Завдання та правові засади здійснення моніторингу за інвазивною рослинністю	10
1.3. Дистанційні методи моніторингу інвазивних рослин	14
Розділ 2. Методологія дослідження ареалів поширення Борщівника Сосновського за матеріалами оптико-електронного дистанційного зондування Землі.	20
2.1. Теоретичні засади методології виявлення і вивчення параметрів рослинності за аерокосмічними зображеннями.....	20
2.2. Аналіз спектральних особливостей відображення борщівника Сосновського..	23
Розділ 3. Дистанційний моніторинг борщівника Сосновського з безпілотних літальних апаратів (БПЛА).....	30
3.1. Методика виявлення інвазивних рослин і створення карти поширення борщівника Сосновського.....	30
3.2. Особливості аерознімання вражених борщівником Сосновського ділянок з БПЛА.....	34
3.3. Фотограмметричне опрацювання аерознімків.....	38
3.4. Геоінформаційний аналіз карт вегетаційного індексу.....	40
Розділ 4. Охорона довколишнього середовища	43
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

ВСТУП

Поширення інвазивних видів рослинності, зокрема Борщівника Сосновського (*Heracleum sosnowskyi* Manden) є актуальною екологічною проблемою в Україні. Ця карантинна рослина становить загрозу для біорізноманіття, спричиняє деградацію природних та антропогенних екосистем, негативно впливає на здоров'я населення та господарську діяльність. Ефективний моніторинг територій, уражених інвазійними видами, повинен ґрунтуватись на оперативно отримуваних, достовірних, точних даних. Сучасні геоінформаційні технології у поєднанні з даними дистанційного зондування з космосу і безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяють здійснювати високодетальний аналіз структури рослинного покриву, автоматизувати процеси виявлення осередків інвазійних рослин та забезпечувати науково обґрунтоване управління такими територіями. Саме тому дослідження алгоритмів локалізації та картографування Борщівника Сосновського на основі аерокосмічних знімків є актуальним та має значну практичну цінність.

Об'єктом дослідження є процеси поширення інвазивних видів рослинності, зокрема борщівника Сосновського, у межах вибраної території дослідження.

Предметом дослідження є методи опрацювання аерокосмічних зображень для виявлення, картографування та оцінювання динаміки поширення борщівника Сосновського.

Мета дослідження: розробити та обґрунтувати методику застосування космічних та аерофотознімків з БПЛА для виявлення та картографування ареалів поширення борщівника Сосновського на прикладі конкретної території.

Завдання дослідження наступні:

Проаналізувати сучасні підходи до моніторингу інвазивних видів рослинності та особливості їхньої відбивної спектральної здатності;

Здійснити збір та підготовку вхідних даних, зокрема аерофотознімків з БПЛА;

Розробити технологічну схему обробки космічних і аерознімків, включаючи фотограмметричне опрацювання, створення ортофотопланів та цифрових моделей;

Апробувати алгоритми виявлення борщівника, зокрема через спектральні індекси, класифікацію, сегментацію зображень та машинне навчання;

Методи дослідження:

аналіз мультиспектральних аерофотознімків, розрахунок спектральних індексів, інтерпретація зображень;

фотограмметрична обробка: створення ортофотопланів, цифрових моделей місцевості (ЦМР/ЦМП) у програмному забезпеченні Pix4D.

Розділ 1. Теоретичні та правові засади здійснення моніторингу за інвазивною рослинністю.

1.1. Борщівник Сосновського (*Heracleum Sosnowskyi*) - інвазивний вид рослинності у Львівській області та на суміжних територіях.

Згідно з офіційним термінологічним визначенням, «інвазивні чужорідні види» — це немісцеві (чужорідні) види, навмисно або ненавмисно інтродуковані за межами їх природного ареалу, які осіли, розмножуються й поширюються у новому для них середовищі таким чином, що завдають шкоди середовищу, до якого їх було ввезено [9].

Інвазії адвентивних видів є одним з найбільш важливим факторів динамічної трансформації природних екосистем, швидко і неконтрольовану практично незворотну зміну видового різноманіття окремих екосистем і ландшафтів цілих регіонів. Результатом є зменшення біорізноманіття; зміна місцевих сукцесійних систем та витіснення аборигенних видів рослин. Це приносить також значну економічну шкоду, потенційну загрозу здоров'ю людей та свійських тварин.

Процес інвазії суттєво пришвидшують глобальне потепління клімату і інтенсифікація економічних стосунків із збільшенням транспортних потоків. Тому інвазії чужорідних видів визнані глобальною екологічною проблемою. [22].

Складним технічним і організаційним завданням є моніторинг, локалізація та контролювання чисельності чужорідних (інвазивних) видів рослин на території країни в цілому та її окремих частин. Частиною такої діяльності є її нормативно-правове, організаційне та технічне забезпечення на міжнародному, національному та місцевому рівнях управління територіями [2, 5]. Територіальні громади в Україні складають і реалізують власні Програми моніторингу, локалізації та контролювання чисельності чужорідних (інвазивних) видів рослин, наприклад [7, 8].

Для біорізноманіття в межах України загрозливим є поширення багатьох інвазійних рослин. До таких відносяться серед інших такі види: борщівник Сосновського (*Heracleum sosnowskyi*) (рис.1.1), золотарник канадський (*Solidago canadensis* L.), клен американський (*Acer negundo* L.), дуб червоний (*Quercus brabra*), амброзія звичайна (Амброзія полинолиста (*Ambrosia artemisiifolia* L.), молочай звичайний (*Asclepias syriaca* L.), срібляста ягода (*Elaeagnus angustifolia*), американська польова трава (*Phytolacca Americana*), екбалліум (*Ecballium elaterium*), піщаниця звичайна (*Cenchrus pauciflorus* Benth), ячмінь стінний (*Hordeum murinum* L.), топінамбур (*Helianthus tuberosus*) та ін.

Чужорідні інвазивні види, завезені в регіон з інших країн, можуть рости на новому місці десятиліттями без подальшого поширення. Коли вид досягає експоненціальної фази, його поширення стає швидким і важким для контролю. Так сталося з гігантським *Heracleum Sosnowskyi* в Європі та Україні. У Європі відомо понад 20 видів різних видів рослини роду *Heracleum*. Три види, *Heracleum Mantegazzianum*, *Heracleum Sosnowskyi* та *Heracleum Persicum*, складають групу *Heracleum gigantic*. *Heracleum Sosnowskyi* був ідентифікований у 1944 році І.П. Манденовою та названий на честь відомого дослідника флори Кавказу Д.І. Сосновського. Його батьківщиною є Центральний та Східний Кавказ, Закавказзя та Туреччина. У 2016 році борщівник Сосновського оголошено інвазивним видом Європейського Союзу та внесено до списку інвазивних чужорідних видів, і відповідно всі країни-члени зобов'язані контролювати його поширення. Щороку муніципалітетам виділяються кошти зі спеціальної програми муніципальної підтримки охорони навколишнього середовища, які також можуть бути використані для знищення інвазивних видів. За вирощування, розмноження, обмін інвазійних видів передбачені штрафи.



Рис.1.1. Борицівник Сосновського в природному та селитебному ландшафтах

Heracleum Sosnowskyi - один з найбільш поширених і небезпечних інвазивних видів рослинності в Україні, особливо у північних і західних областях. Це рослина відкритих місць, росте на ґрунтах, луках, у чагарниках, чагарниках, біля водойм. Основними місцями його зростання є береги ставів, потоків, узбіччя доріг, каналів, пасовища, необроблювані сільськогосподарські землі. Також поширюється ця рослина і на прилеглих територіях житлових масивів. Її дедалі частіше можна побачити і в урбанізованих районах. Ця інвазійна рослина не тільки швидко поширюється, замінюючи місцеві рослини, але й надзвичайно небезпечна для людини. У всіх частинах рослини накопичується фуранокумарин — речовина, яка може викликати опіки шкіри I-III ступеня, якщо людина підійде близько до рослини, зриває її чи косить. Боротьба з цим бур'яном — є одним із пріоритетних і актуальних напрямків екологічної діяльності останнім часом. Перспективним методом ідентифікації площ, зайнятих борщівником Сосновського, є використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [20].

Одна з проблем в боротьбі з борщівником полягає в його живучості і масштабному поширенні насіння навіть з одиничних рослин. Через це для виявлення і складання карт для знищення цієї рослини необхідно або вручну обходити поля та інші території, або використовувати літальні апарати - більшість супутників дають недостатньо високе просторове розрізнення для виявлення одиничних рослин. Але облік рослин за допомогою літальних апаратів поки слабо автоматизований і часто заснований на застосуванні дорогих в експлуатації літаків.

Через те, що *Heracleum Sosnowskyi* має значну зелену масу та містить велику кількість білка (10-17% сирого протеїну), цю рослину взяли для селекції з метою отримання кормів для тваринництва. З 1960-х років його культивують як кормову рослину для годівлі худоби в сільськогосподарських підприємствах. На початку 90-х років, у зв'язку з економічною та земельною реформою в нашій країні та розпадом радгоспів і колгоспів, він вийшов з-під контролю та почав інтенсивно поширюватися на занедбаних землях, у садівничих зонах, на схилах

меліоративних каналів, узбіччях доріг, а останнім часом почав проникати на землі населених пунктів (рис.1.1). Сік гераклеуму Сосновського містить речовину фурукумарини, при потраплянні на шкіру людини під впливом ультрафіолетових променів це призводить до сильних опіків поверхні тіла. У деяких випадках сік гераклеуму Сосновського може викликати токсичне отруєння у людей, яке супроводжується порушенням роботи нервової системи та серцевого м'яза. Тому ця екологічно небезпечна рослина становить серйозну загрозу для здоров'я людини.

Листя рослин *Heracleum Sosnowskyi* має характерні форми та конфігурації. Стебло майже пряме. Середня товщина стебла біля основи коливається від 4 до 10 см. На стовбурі та листових живцях видно темно-червоні жилки, кількість яких залежить від умов навколишнього середовища, яким піддаються рослини. Листок має виражену кривизну та демонструє зшивання. Розмір листка зазвичай більший порівняно з травами, що ростуть поруч. В межах однієї популяції рослин є листки із заокругленими або загостреними кінцями. Суцвіття являє собою складну парасольку, діаметром до 60 см. Кількість квіток, що утворюються в одному суцвітті, може сягати 150. Одна рослина може містити 70 000 квіток. Одна доросла рослина утворює близько 30 тисяч насінин. HS значно вищий за всі трави, що ростуть навколо нього. Якщо це дике поле, парасолька має висоту близько 2 м. Якщо газон скошено в той час, коли інші трави зазвичай досягають висоти 15–20 см, листя досягне довжини 45–60 см. Таким чином, виявлення та знищення рослин *Heracleum Sosnowskyi* до формування суцвіть має вирішальне значення для контролю його поширення та поширення. При високій роздільній здатності ортофотознімків до 5 см/піксел рослини *Heracleum Sosnowskyi* візуально помітні. Після того, як присутність *Heracleum Sosnowskyi* візуально підтверджена на карті, виявлене місцезнаходження фіксується у відповідних протоколах.

1.2. Завдання та правові засади здійснення моніторингу за інвазивною рослинністю.

Здійснення державного контролю за використанням та охороною земель, відповідно до наданих законодавством України повноважень, у частині проведення комплексу заходів із запобігання заростанню земель бур'янами, чагарниками та дрібноліссям покладається на територіальні органи Держгеокадастру. Контроль за виконанням власниками та користувачами земель заходів із захисту земель від заростання зазначеними рослинами здійснюється виконавчими комітетами сільських, селищних та міських рад у разі прийняття ними відповідного рішення. Такі рішення готуються органами місцевого самоврядування на виконання статей 91, 96 Земельного кодексу України, статей 3, 35, 36, 37 Закону України «Про охорону земель», статей 5, 6, 9 Закону України «Про захист рослин», статей 15, 19 Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», статті 4 Закону України «Про рослинний світ», статей 10, 28 Закону України «Про карантин рослин», з метою забезпечення реалізації державної політики в галузі захисту рослин, зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище і здоров'я населення, додержання земельного і природоохоронного законодавства та здійснення комплексних заходів щодо боротьби з борщівником Сосновського (наприклад, [7,8]).

За статтею 52 Кодексу України про адміністративні правопорушення «Псування і забруднення сільськогосподарських та інших земель» передбачено накладення штрафів за невжиття заходів щодо боротьби з бур'янами. Землевласники та землекористувачі, які не вживають відповідних заходів, зокрема щодо боротьби з борщівником Сосновського, підлягають адміністративній відповідальності з накладенням штрафу:

- на громадян – від 340 до 1360 грн;
- на посадових осіб та суб'єктів підприємницької діяльності – від 850 до 1700 грн.

Невжиття заходів також може стати підставою для припинення права на земельну ділянку відповідно до статті 143 Земельного кодексу України [1, 10].

1.3. Дистанційні методи моніторингу інвазивних рослин

У Звіті Міжурядової платформи з біорізноманіття та екосистемних послуг (IPBES) щодо оцінки інвазивних чужорідних видів та їх контролю (так званий «Звіт про інвазивні чужорідні види») зазначено, що понад 37 000 чужорідних видів було інтродуковано в різні регіони та біоми світу внаслідок різноманітної діяльності людини. У документі також підкреслюється, що поряд із значними змінами у біорізноманітті та структурі екосистем, глобальні економічні витрати, пов'язані з інвазивними чужорідними видами, у 2019 році перевищили 423 мільярди доларів США на рік, при цьому витрати зростали щонайменше в чотири рази за кожне десятиліття починаючи з 1970 року [19]. Відтак актуальним є завдання виявлення та локалізації інвазій. Традиційні методи моніторингу недостатньо ефективні – його організація і результати надто сильно залежні від людського фактору. Поряд із польовими обстеженнями та лабораторним аналізом, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є важливим інструментом моніторингу рослинних видів. Виявлення та просторово-часовий розподіл на території рослинності, у тому числі інвазивної, можна здійснювати дистанційними методами - за допомогою різноманітних датчиків, які несуть супутники, літаки та дрони.

Широкий спектр зображень від різних оптичних датчиків (видимого діапазону, мультиспектральні, гіперспектральні) дозволяє отримувати корисну інформацію для картографування рослинності. Вивчення спектрального відклику рослин на основі даних, зібраних з допомогою ДЗЗ, має великий потенціал для ідентифікації, локалізації ареалу поширення, визначення морфометричних параметрів (наприклад розмірів і щільності висіву рослин), їх стану тощо.

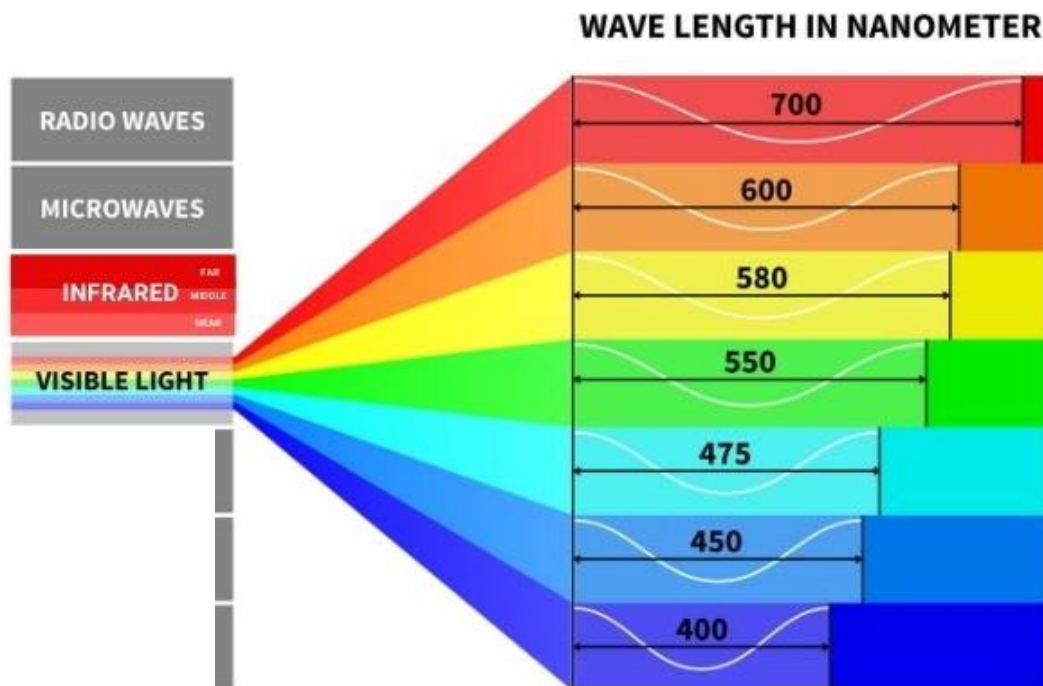


Рис.1.2. Електромагнітний спектр для виконання ДЗЗ

Моніторингові дослідження рослинності ґрунтуються на відмінностях у відбивній здатності між рослиною (наприклад, борщівником) та іншими рослинними і штучними об'єктами довкілля [3].

Засоби космічного дистанційного зондування добре підходять для розпізнавання великомасштабних рослинних інвазій. Космічне знімання надає об'єктивні дані на значні площі. Ці дані мають відносно низьку вартість у порівнянні з іншими методами. Проте знімки із супутників мають недостатнє просторове розрізнення, щоб виявити окремі рослини, а залежність від погоди і періодичності виконання знімань роблять такий метод непрактичним для отримання найбільш точної і актуальної інформації. Для вирішення завдань на такому рівні застосовують пілотовані та безпілотні літаючі апарати як носії апаратури для моніторингу. Така апаратура – це в першу чергу оптичні датчики та засоби візуальної і супутникової навігації [11].

Космічні зображення дозволяють досліджувати величезні території за менший час і є дешевшим, ніж польове дослідження. Датчики, які переносяться цими платформами, можуть бути пасивними та вимірювати сонячне світло,

відбите від Землі і об'єктів на її поверхні, або можуть бути активними, створюючи власне джерело світла, яке згодом відбивається назад і вимірюється.

Пасивні супутникові системи, такі як NASA Landsat (30 м просторова роздільна здатність у видимій, ближній інфрачервоній та короткохвильовій інфрачервоній частинах світлового спектру, тобто, VIS, NIR, SWIR) і Sentinel-2 (10м просторова роздільна здатність, зображень в каналах: синій (490 нм, смуга пропускання 65 нм), зелений (560 нм, смуга пропускання 35 нм), червоний (665 нм, смуга пропускання 30 нм) та 20 м в ближній інфрачервоній зоні (842 нм, смуга пропускання 115 нм)), як і знімки із інших штучних супутників мають недостатнє розрізнення для розпізнавання окремих рослин але можуть ефективно фіксувати ландшафтні особливості з середньою просторовою роздільною здатністю з кількох спектральних смугах за допомогою мультиспектральних датчиків. Однак комерційні супутники, такі як Worldview-3 (1м у видимому діапазоні і 24 м NIR, 3-7 м в зоні SWIR), здатні генерувати набори даних з точною просторовою роздільною здатністю, що дозволяє більш детально досліджувати особливості рослинності, хоча й з відносно високими фінансовими витратами.

Найзручніше ідентифікувати ареали поширення борщовика Сосновського із космічних зображень роздільної здатності від одного метра до десяти метрів. Найбільш підходящими даними для цього є багатоспектральні знімки оптичного діапазону із супутників: Landsat-8, Сентініел-2, RapidEye, SPOT 6,7, Triplesat, WorldView-2,3 і багатьох інших. Для досліджень з регіональним охопленням добре підходять зображення Sentinel-2. Їх просторова роздільна здатність 10 метрів дає можливість виявити ділянки суцільного заростання та поширенн невеликими групами рослин борщівника Сосновського площею 0, 01 га. А повторюваність зйомки (часове розрізнення) 5 днів дозволяє за порівняно короткий час охопити великі території (за сприятливими умовами хмарності). З допомогою програмного забезпечення геоінформаційних систем (ГІС) є можливість розраховувати зміни площ ділянок суцільного заростання борщівника Сосновського в межах досліджуваної території. Методика дозволяє

визначати періоди максимального росту борщівника та встановлювати тенденції зміни площ його суцільних заростів. Однак точність визначення цих параметрів сильно залежить від багатьох факторів, зокрема від методу опрацювання даних, типу рослинності та фази її вегетації тощо. З наукових публікацій встановлено, що надійність розпізнавання борщовика Сосновського на фоні інших трав'яних і деревних рослин за результатами класифікації космічних знімків високого розрізнення Worldview-3 досягала 83% [21]. Аналогічна точність виявлення цієї інвазивної рослини за спектральними ознаками космічних зображень відмічена й в роботах інших авторів [17].

Основні технічні специфікації висоти огляду та розрізнення отримуваних знімків з різних платформ ДЗЗ приведено в роботі [17].

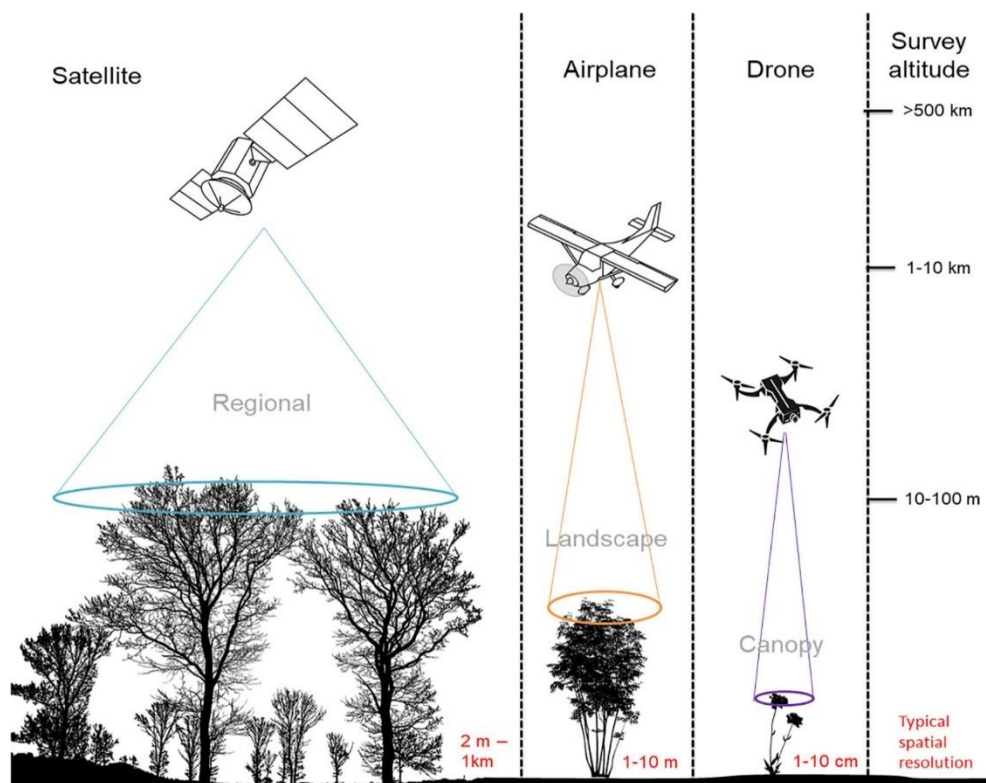


Рис.1.3. Приблизні робочі висоти супутникових, літакових і безпілотних платформ ДЗЗ для отримання зображень. Відповідні захоплення поля зору знімків, які використовуються для вивчення рослинності з різних висот ілюструють масштаби ландшафту, який можна побачити з одного зображення

Вибір способу отримання просторових даних завжди є компроміс між високим розрізненням, часовою доступністю і вартістю даних. На вибір також впливає методика дослідження для кожної фази вегетації рослин. Типові особливості рослинності, які можна ефективно виміряти кожною з цих платформ дистанційного зондування на рис.1.4. показано у зв'язку з часовими та просторовими можливостями кожного типу знімальних систем.

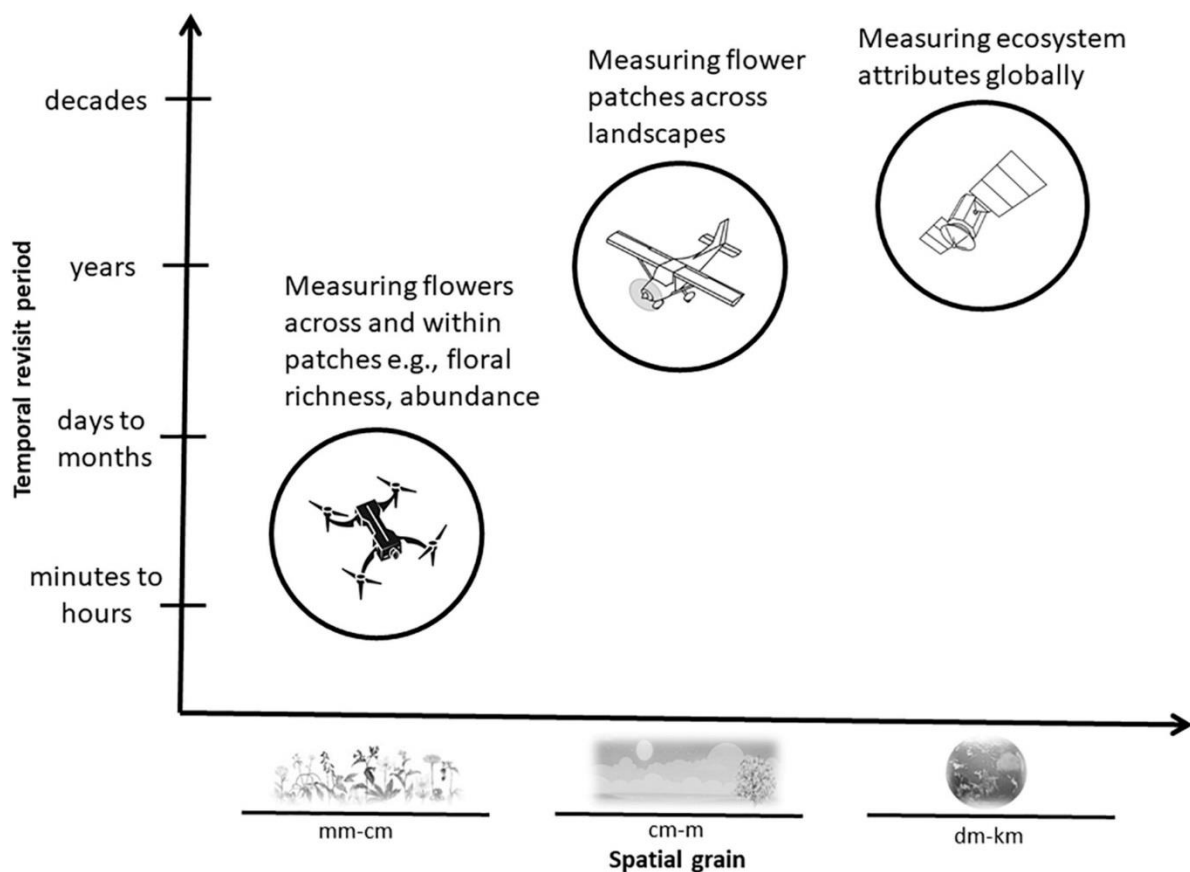


Рис.1.4. Часове та просторове розрізнення даних дистанційного зондування Землі

В таблиці 1.1. подано основні властивості і приблизну вартість багатоспектральних, RGB, гіперспектральних даних дистанційного зондування Землі, отримуваних з різних знімальних платформ [26].

Таблиця 1.2. Типи даних, отримуваних супутниковими платформами, платформами на літаках і безпілотниках і наземними системами

Платформа	Структурні (просторові) дані	Типове просторове розрізнення	Простір охоплення	Максимальне часове розрізнення
Супутник	Оптичні, LiDAR, Радарні	0,3 м – 1 км	До десятків тисяч км	2 дні – понад 1 тиждень
Вартість даних: безкоштовно (більшість наукових супутників), \$1–40+ / км ² (комерційні супутники)				
Літак	Оптичні, LiDAR, Радарні	~1 м	До кількох тисяч км	Необмежено
Вартість оренди літака: ≈ \$1,000–\$10,000/год. Вартість сенсорів: ≈ \$1,000–\$50,000				
Дрон	LiDAR Фотограмметрія за методом Structure from Motion	~0,01 м	До ~10 км	Необмежено
- Вартість дрона: ~ \$50–\$10,000 (з вбудованою камерою) - Вартість сенсора: ~ \$100 (Go-Pro) – \$50,000 (гіперспектральний сенсор)				
Наземний сенсор	Наземний лазерний сканер (TLS) Фотограмметрія за методом Structure from Motion	~0,01 м	Менше 1 км	Необмежено
- Вартість монтажу сенсора: ~ \$10 (стаціонарний штатив) – \$1,000 (рухома платформа) - Вартість сенсора: ~ \$100 (Go-Pro) – \$50,000 (гіперспектральний сенсор)				

Розділ 2. Методологія дослідження ареалів поширення Борщівника Сосновського за матеріалами оптико-електронного дистанційного зондування Землі

2.1. Теоретичні засади методології виявлення і вивчення параметрів рослинності за аерокосмічними зображеннями

Спектральна відбивна здатність є важливою характеристикою рослинності та показником її стану, оскільки різні довжини електромагнітних хвиль відбиваються рослинними покриттями по-різному. Розуміння взаємозв'язку між структурою й фізіологічним станом рослинності та її відбивними властивостями дає змогу застосовувати космічні знімки для розпізнавання типів рослинності й оцінювання їхнього стану [6].

У контексті досліджень рослинності мультиспектральні та гіперспектральні дані, отримані від датчиків, встановлених на супутниках, літаках і дронах, часто аналізують за допомогою спектральних індексів рослинності (VI, вегетаційні індекси), які є результатом математичних операцій з коефіцієнтами відбиття в заданій точці простору у двох або більше спектральних смугах (Табл.2.1). Математичні формули для розрахунку вегетаційних індексів використовують певні діапазони зображень - це задані діапазони довжин хвиль у межах електромагнітного спектру, що фіксуються камерою супутника чи дрона.

Враховуючи, що інвазивні рослини здебільшого проявляються не на антропогенно перетворених (рілля, відкритий ґрунт) а на природних ділянках, для досліджень інвазивної рослинності здебільшого застосовують індекси, засновані на контрасті між спектральним відгуком рослинності у червоному (red) та інфрачервоному (infrared) спектральних діапазонах: NDVI, RVI, NRVI, TVI, CTVI, TTVI, індекс співвідношення RATIO. Ці індекси, чутливі до рослинної маси [4]. Так, конкретно для виявлення ареалів борщівника Сосновського, часто

вживаються NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) і ClGreen (Green Chlorophyll Index) [24].

Таблиця 2.1. Ознаки зображень рослинності на знімках оптичного діапазону

Категорія ознак	Позначення, Опис
Статистичні	Mean, Maximum, Standard deviation, 95 th percentile, Skewness
Текстурні / Textural	GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix, Матриця спільної появи рівнів сірого): контраст, кореляція, ентропія, однорідність, кутовий другий момент, середнє значення, стандартне відхилення) GLDV (Gray Level Difference Vector, Вектор різниці рівнів сірого): контраст, ентропія, середнє значення, кутовий другий момент.
Геометричні / Geometric	ширина, довжина, компактність (Width, length, compactness)
Спектральні / Spectral	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) = $(\text{NIR1} - \text{red}) / (\text{NIR1} + \text{Red})$
	RENDVI (Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index) = $(\text{NIR1} - \text{RE}) / (\text{NIR1} + \text{RE})$
	VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) = $(\text{green} - \text{red}) / (\text{green} + \text{red} - \text{blue})$
	RGR (Red Green Ratio) = $\text{red} / \text{green}$
	SR (Simple Ratio) = $\text{NIR1} / \text{red}$
	CI (Colour Index) = $(\text{red} - \text{green}) / (\text{red} + \text{green})$
	BI (Brightness Index) = $(\text{red}^2 + \text{NIR1}^2)^{0.5}$

	$\text{NDWI (Normalized Difference Water Index)} = (\text{green} - \text{NIR1}) / (\text{green} + \text{NIR1})$
	$\text{NIR-RE ratio} = (\text{NIR1} - 3.06 \times \text{RE}) / (1.71 \times \text{NIR1} - 2.42 \times \text{RE} - 4.14)$

Хоча найпоширеніший підхід до виявлення видів рослин та їх стану базується на відмінностях у спектральних сигнатурах, фенологічні підходи, що базуються на сезонних подіях, таких як цвітіння, виявилися ефективними у виявленні деяких інвазивних видів рослин. Різні фенологічні закономірності можуть забезпечити можливості для дистанційного виявлення, якщо інвазивний вид, що розглядається, має інший сезонний або міжрічний характер росту порівняно з видами, що зустрічаються з ним разом, або квіткові характеристики, які можуть допомогти у спектральному розрізненні виду рослини від його фону, такі як квітучі дерева *Acacia salicina* та *Acacia saligna*, борщівник гігантський (*Heracleum mantegazzianum*), спориші (*Fallopia* spp.) та *E. plantagineum*.

Таблиця 2.2. Джерела даних та отримані за ними ознаки (морфометрія рослин та їхніх угруповань, спектральні індекси), які використовують для класифікації та сегментації знімків

Джерело даних	Символ	Застосування
RGB-ортотрансформоване зображення	RGB-O	Використовується для сегментації зображення
Цифрова модель видимої поверхні	pDSM	Використовується для вилучення морфометричних ознак: нахил, кривизна, шорсткість, dDEM, dDSM.
Мультиспектральне ортотрансформоване зображення	MC-O	Використовується для виділення спектральних ознак і вегетаційних індексів рослинності

Джерело даних	Символ	Застосування
Цифрова висотна модель місцевості. Роздільна здатність біля $1\text{ м} \times 1\text{ м}$	rDTM	Використовується для вертикальної корекції та розрахунку висоти над рельєфом (dDEM)
Цифрова висотна модель видимої поверхні; Роздільна здатність $1\text{ м} \times 1\text{ м}$	rDSM	Використовується для розрахунку висоти крон над поверхнею землі за моделлю (dDSM)

NIR: Near-infrared, Близький Інфрачервоний, RE: Red-Edge, Червоний край.

2.2. Аналіз спектральних особливостей відображення борщівника Сосновського

Стандартні камери видимого діапазону RGB знімають у червоній, зеленій та синій ділянках, що призводить до отримання зображень, які відносно точно відображають кольори, сприйняті людським оком (тобто зображення у справжніх, природних для ока людини кольорах). На цьому типі зображень кольори виглядають природними та дуже нагадують те, що можна побачити в реальності, що робить їх корисними для візуальної інтерпретації та аналізу. Індекси рослинності, такі як VARI та інші, використовують червоний, зелений та синій діапазони зі стандартних камер для візуалізації здоров'я рослин.

На космічних знімках у природному кольоровому синтезі (RGB) *Heracleum Sosnowskyi* ідентифікується яскраво-зеленим кольором, що виділяється з решти трав'янистої рослинності (рис. 2.1).

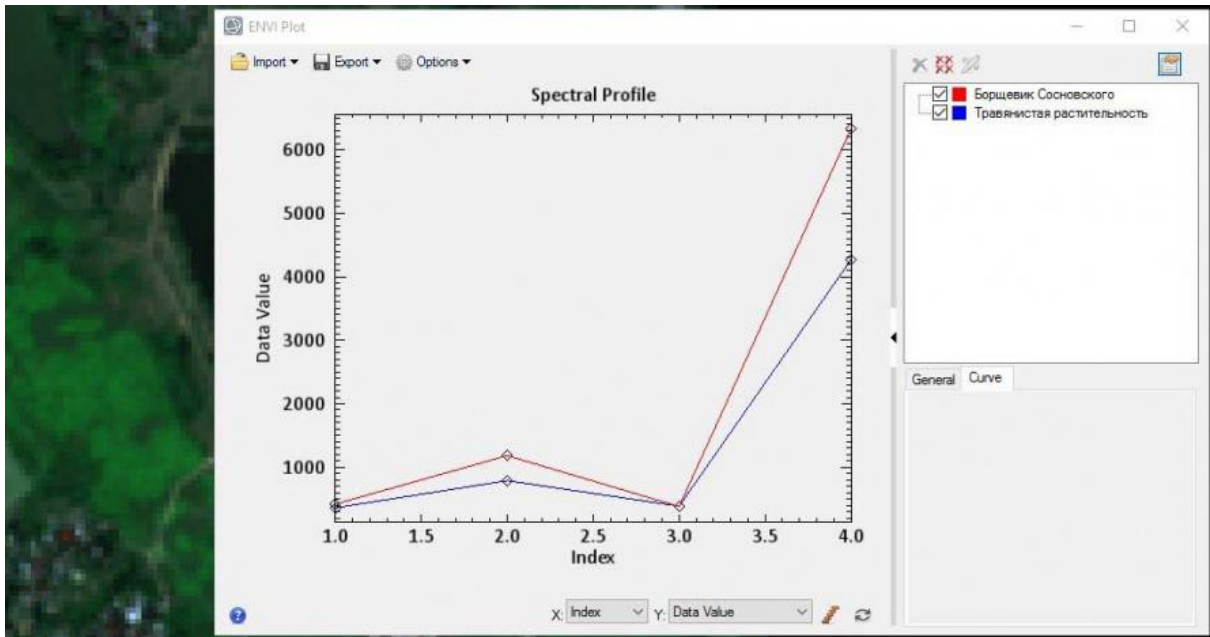


Рис. 2.1 Борщівник Сосновського на космічному знімку Sentinel-2 (яскраво-зелений)

Висока біомаса рослини забезпечує сильний спектральний відгук, що дозволяє ідентифікувати навіть невеликі діпазони з невеликим проєктивним покриттям. Все це дозволяє з досить високою точністю ідентифікувати борщівник Сосновського на космічних знімках.

В інфрачервоному спектрі знаходиться ближній інфрачервоний діпазон (NIR), який прилягає до видимого спектру і середній інфрачервоний діпазон (SWIR). Хоча ці інфрачервоні діпазони невидимі для людського ока, вони відіграють життєво важливу роль в оцінці здоров'я рослин, оскільки рослини реагують на ближнє інфрачервоне світло таким чином, що це вказує на їх загальний стан здоров'я. Зафіксувавши зображення в інфрачервоних діпазонах, ми можемо оцінити вміст хлорофілу в рослинах, що дає нам підказки щодо життєздатності рослини до видимих змін у забарвленні рослини.

В науковій літературі описано ряд фотометричних досліджень, де встановлений факт, що борщівник Сосновського на космічних знімках виявляється досить впевнено, оскільки має посилене відбиття в зеленому (550 нм) і ближньому інфрачервоному (830 нм) спектральних діпазонах. На

рисунку 2.2 показана крива спектральної яскравості борщівника Сосновського, отриманого лабораторним спектрометром у різних фазах росту порівняно зі звичайною трав'янистою рослинністю. Причому відбивна здатність рослини забезпечує найбільш близькі значення яскравості в синьому і зеленому спектральних діапазонах, а найбільші значення – в ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні [27].

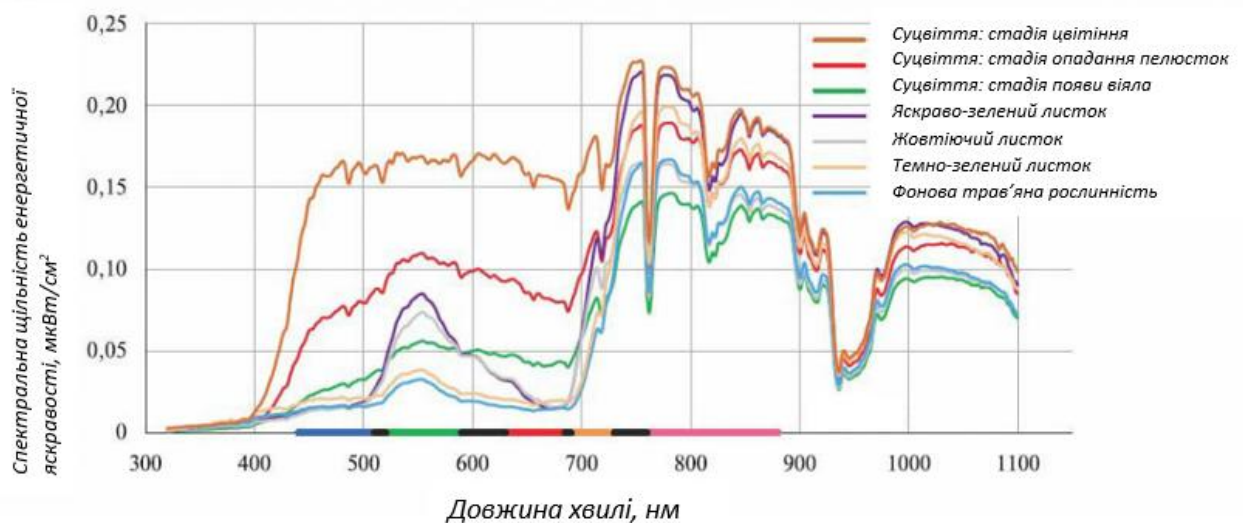


Рис. 2.2 Крива спектральної яскравості борщівника Сосновського за фотометричними дослідженнями

Графік 2.2 наглядно демонструє, що старіючий лист борщівника Сосновського відрізняється від навколишньої рослинності набагато менше на відміну від відмінності у початкових фазах вегетації і під час цвітіння. Тому для ідентифікації цього бур'яну найбільше підходять знімки, отримані з травня по липень.

Другою особливістю слід врахувати, що існує дуже невелика кількість легких багатоспектральних камер (якими можна оснащувати БПЛА), здатних отримувати зображення в SWIR діапазоні. Тому узагальнено крива на рис.2.2. буде мати вид, проедставлений на рис.2.3 [23].

На рис.2.3. чітко відображено характерні особливості відбивної здтності борщівника. Ключові спектральні характеристики:

- Яскраво виражений “зелений пік” (≈ 550 нм) - через густу яскраво-зелену, соковиту листову тканину;
- Глибокий мінімум у червоному діапазоні (≈ 650 – 680 нм) – таким чином проявляється активне поглинання хлорофілу;

Різкий підйом кривої у ділянці червоного краю (red-edge зони, ≈ 700 – 740 нм) — властиво великим швидкоростучим інвазивним видам;

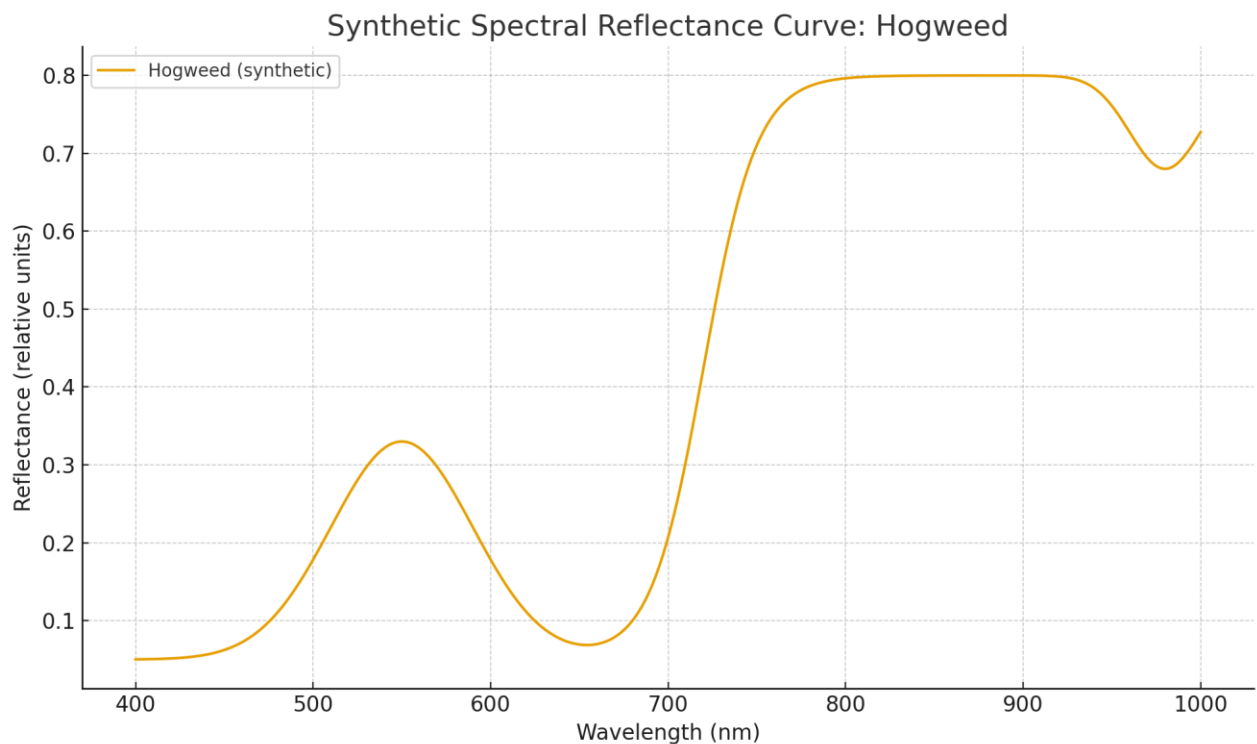


Рис. 2.3 Узагальнена крива спектральної яскравості для борщівника Сосновського без врахування каналу SWIR

- Високий рівень відбиття в NIR (≈ 800 – 900 нм) — прояв дуже товстої листової маси борщівника (товсті мезофільні листки) порівняно з трав'яною рослинністю;
- Невелике падіння кривої в області SWIR зони (≈ 950 – 1000 нм) — через постійно високу вологість листя. Високим вміст води (зниження у SWIR зоні для мульти і гіперспектральних камер).

Приведені властивості поведінки кривої спектральної яскравості є підставою для спроби розробки спеціального спектрального вегетаційного індексу для борщовика Сосновського – *Heracleum Sosnowskyi Index*, *Hogweed Spectral Index* (HSI), який підсилює виразну різницю на знімках між борщівником і іншою вузько- і широколистою рослинністю. Цей індекс виділяє борщівник точніше, ніж NDVI, GNDVI та Red-Edge NDVI, тому що використовує саме ті довжини хвиль, на яких борщівник має характерні піки/пади спектральної кривої.

Розглянемо базовий варіант індексу HSI (для RGB+NIR камер). Формула HSI₁:

$$HSI_1 = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Green)} \quad (2.1)$$

Інтерпретація індексу:

- Чисельник (*NIR – Red*): максимізує вплив різкого контрасту між високим *NIR* та низьким *Red* у борщівника.
- Знаменник (*NIR + Green*): стабілізує індекс та виділяє об'єкти з високою відбивною здатністю в зеленій зоні.

Поведінка числових значень індексу в діапазонах:

- $HSI > 0.35-0.45$ прояв типових значень для борщівника;
- $HSI 0.15-0.30$ прояв іншої широколистої рослинності;
- $HSI < 0.10$ трави, ґрунт, штучні поверхні.

Розширимо варіант індексу HSI₂ для мультиспектральних камер. У цьому випадку додається можливість використовувати зони SWIR1 або SWIR2. Ці зони дуже інформативні, адже борщівник має вищу вологість порівняно з фоновією рослинністю, тому SWIR відбиття у нього має нижчі числові значення. Формула HSI₂:

$$HSI_2 = \frac{(NIR - Red) + (Green - SWIR_1)}{(NIR + Green + SWIR_1)} \quad (2.2)$$

Пояснення до застосованих компонентів формули:

- (*Green - SWIR₁*): підсилює ефект вологості листків;
- (*NIR - Red*): ключовий фотосинтетичний контраст;
- Нормалізація через суму спектральних каналів робить індекс стабільним у змінних умовах освітлення і при високій вологості на ділянці в момент отримання зображення.

Типові пороги числових значень розширеного варіанту індексу HSI_2 :

- $HSI_2 > 0.42$ вказує, що борщівник перебуває у фенологічній фазі активного розвитку;
- $HSI_2 = 0.25-0.40$ вказує на іншу широколисту рослинність;
- $HSI_2 < 0.20$ вказує на заболочені ділянки, тінь, молоді трави.

В літературі також подається інше розширення індексу HSI_3 , призначене для застосування гіперспектральних камер. У цьому випадку теоретично можна досягнути більш точної ідентифікації борщівника на знімках. Борщівник має характерний локальний мінімум у 705–715 нм та різкий підйом після 740 нм. Це можна використати при складанні формули:

$$HSI_3 = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{555})} \quad (2.3)$$

де:

- R_{705} — позиція «червоного краю»;
- R_{750} — ближній IR;
- R_{550} — зелений канал.

Технологія опрацювання знімків з використанням описаних вегетаційних індексів застосовується для моніторингу великих територій за космічними знімками. Процедура розрахунку індексної карти поширення борщівника може бути реалізована в програмному забезпеченні ГІС і таким чином отримувати растрові карти з візуалізацією ділянок масового росту борщовика Сосновського (суцільне заростання або групами рослин) [13].

Спектральний індекс HSI розроблений для відділення борщівника Сосновського від інших рослин і сільськогосподарських посівів і насаджень. При додатковому використанні індексу NDVI як критерію виявлення рослинності можна усунути ефект впливу антропогенних об'єктів [16, 25, 28], що підвищує точність виявлення борщівника Сосновського. Застосування цих індексів забезпечує якісний результат картографування цього інвазивного виду на основі даних мультиспектрального зондування, отриманих із зображень з безпілотної і космічного апарату (рис. 2.4).



Рис. 2.4 Ділянки борщівника Сосновського, виділені за допомогою індексів HSI та NDVI на космічному знімку або ортофотоплані

Розділ 3. Дистанційний моніторинг борщівника Сосновського з безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

3.1. Методика виявлення інвазивних рослин і створення карти поширення борщівника Сосновського

З приведеного в попередніх розділах аналізу літературних джерел слідує, що вирішення завдання виявлення та картографічного документування ареалів поширення інвазивних рослин може бути виконане на двох рівнях просторового охоплення та картографічної точності. *Перший рівень дослідження* передбачає використання космічних багатоспектральних знімків середнього або високого просторового розрізнення. Опрацювання даних виконується з побудовою карт вегетаційних індексів та класифікації зображень. Його результатом є виявлення великих ареалів суцільного заростання ділянок або великих груп інвазивного виду рослин. Технологічна схема цього рівня вирішення завдання, адаптована для виявлення борщівника Сосновського з використанням спеціального вегетаційного індексу HSI приведена на рис.3.1. Цю схему ми приводимо із змінами та доповненнями з джерела [27].

Вирішення завдання контролю зон проростання борщівника Сосновського за мультиспектральними супутниковими даними включає низку процедур: отримання супутникової інформації; виявлення зон зростання борщівника Сосновського за супутниковими даними; відстеження та аналіз змін зон зростання борщівника Сосновського за допомогою архівних даних; валідацію розробленого методу обробки мультиспектральних супутникових даних різних космічних апаратів.

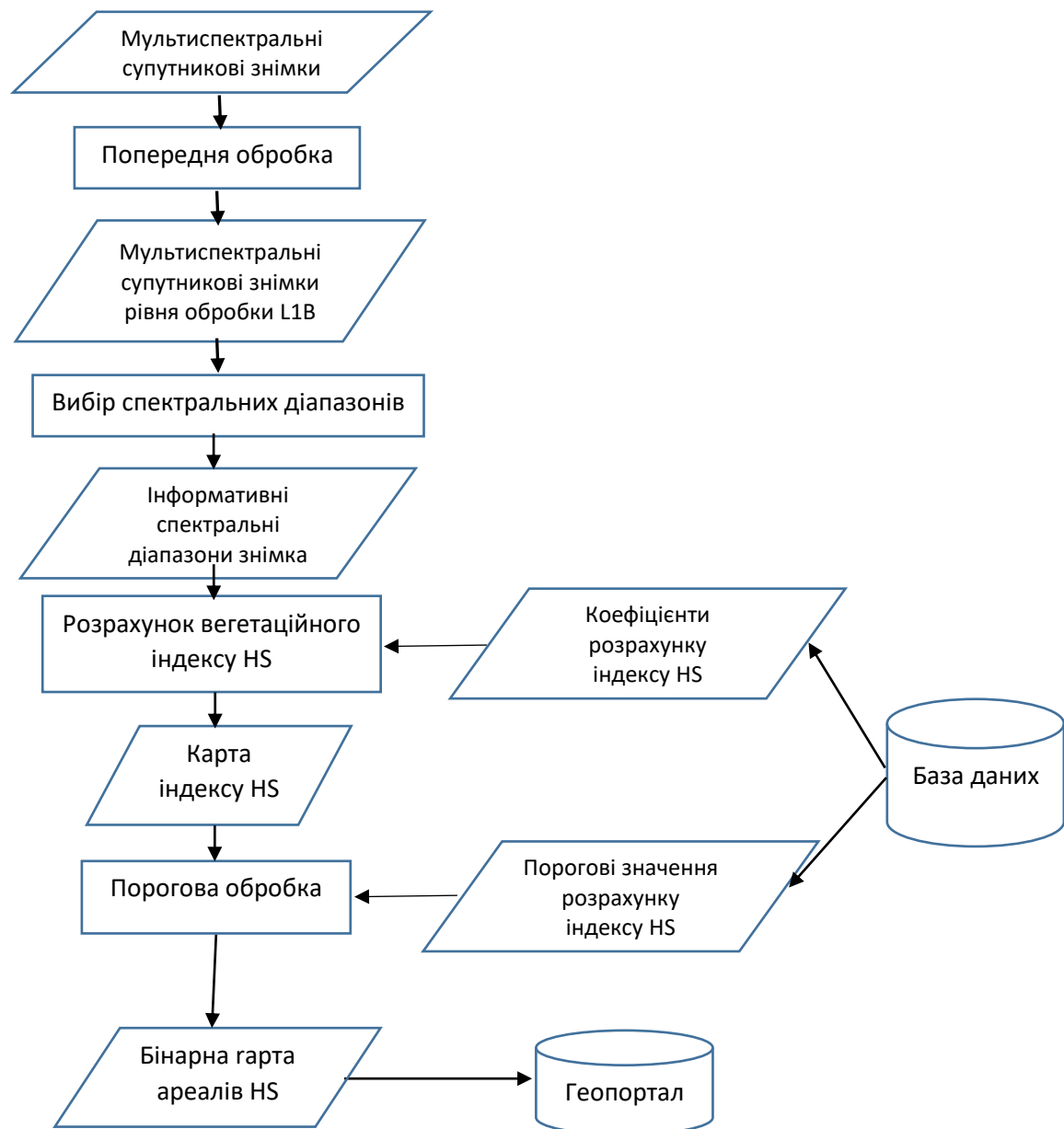


Рис. 3.1. Структурна схема опрацювання супутникової інформації для контролю поширення борцівника Сосновського (HS)

Описані в схемі дії по суті можуть бути одним з етапів моніторингового дослідження територій, який послідовно повторюється протягом терміну вегетації рослини. Отримані результати кожного з цих етапів можуть бути використані для організації **другого масштабного рівня дослідження** – це більш точне і повне відокремлення інвазивного виду від корінних рослин з використанням мультиспектральних сенсорів на БПЛА. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали потужним інструментом для дистанційного моніторингу

інвазивних видів рослин завдяки високій просторовій роздільній здатності знімків та оперативності збору даних. Застосування БПЛА усуває розрив між методами дистанційного зондування великомасштабних супутників та наземними дослідженнями. Результат дослідження на цьому рівні – детальні електронні карти поширення інвазивного виду.

Методологія дослідження ґрунтується на комплексному застосуванні безпілотного літального апарату DJI Phantom 4 Pro, геоінформаційних систем та фотограмметричних методів для картографування і моніторингу інвазивного виду *Heracleum Sosnowskyi* (борщовик Сосновського). Такий підхід дозволяє отримувати високоточні просторові дані про поширення рослин, їх щільність та динаміку.

Структура методики включає наступні етапи:

- Планування польової кампанії та попередній аналіз ділянки дослідження.
- Польові роботи із застосуванням БПЛА, оснащених мультиспектральними, гіперспектральними та RGB фотокамерами.
- Фотограмметрична обробка знімків.
- ГІС-аналіз, створення карт вегетаційних індексів а також класифікація інвазивної рослинності за ортофотопланами та окремими аерознімками.
- Перевірка точності та валідація результатів.

Технологічна схема другого рівня вирішення завдання, адаптована на виявлення борщовика з використанням аерознімків з БПЛА приведена на рис.3.2.

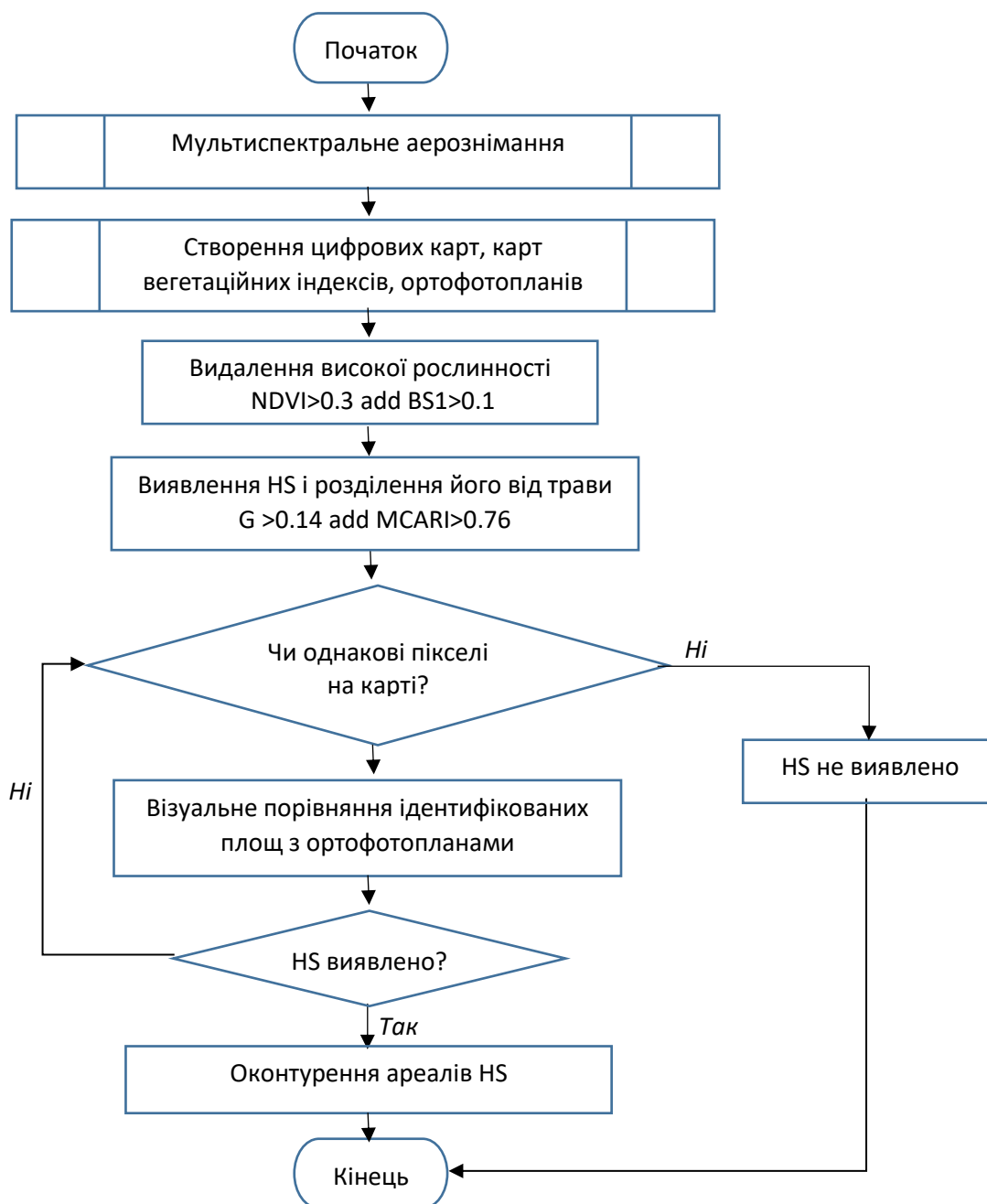


Рис.3.2 Структурна схема опрацювання аерознімків для контролю поширення борщовика Сосновського (HS - *Heracleum Sosnowskyi*)

Для ефективного застосування описаних технологій доцільно інтегрувати їх у єдиний інформаційний простір, доступний як профільним фахівцям, органам місцевого управління та громадянам. У даному контексті геоінформаційні системи (ГІС) виступають ключовою ланкою: вони дозволяють візуалізувати осередки борщівника на фоні земельних та

адміністративних кордонів, формувати картографічні тематичні шари (тип землекористування, кадастрові ділянки, категорії лісів та сільгоспугідь) та планувати заходи щодо обробки територій.

Після кожного з досліджень їхні результати накопичуються в спеціальних базах геоданих, які є частиною як управлінських ГІС так і Автоматизованих систем управління фермерським господарством. На основі цих даних можливе створення карт-завдань для агротехнічних засобів (оприскувачів) (рис.3.3).

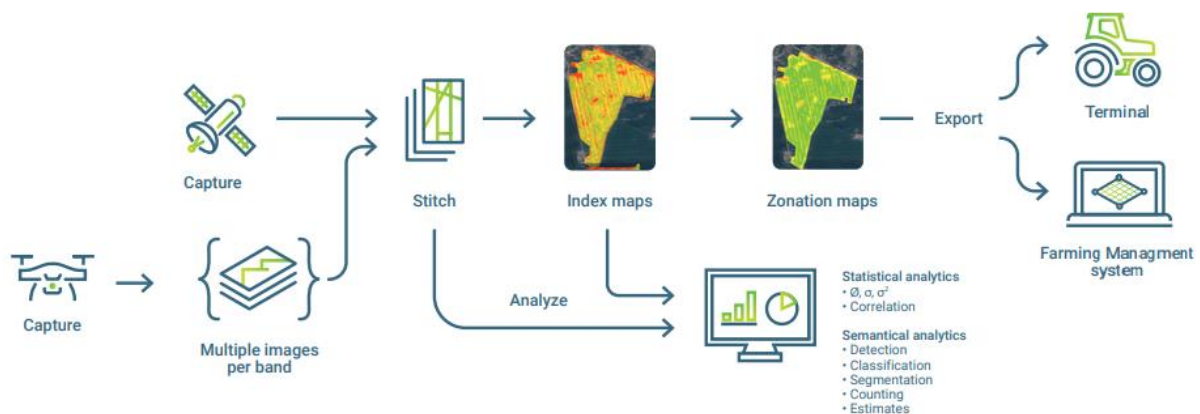


Рис.3.3. Узагальнена схема збору та використання даних про ареали поширення інвазивних видів

3.2. Особливості аерознімання вражених борщівником Сосновського ділянок з БПЛА

Дослідження проводилося у межах полігону твердих побутових відходів с.Новий Яричів (Новояричівська селищна територіальна громада Львівської обл), площа досліджуваної території — приблизно 11,0 га, периметр — 1425м. Ділянка характеризується:

- рельєф з перепадом висот від 220м до 224м над рівнем моря;

чергуванням відкритих просторів, змішаною рослинністю та фрагментами заростей борщівника.



Рис.3.4. Фенологічна фаза розвитку борщівника Сосновського на дослідній ділянці на момент аерознімання 4 травня 2023р

В літературі визначається як найбільш сприятливий час знімання борщівника Сосновського - під час цвітіння, коли рослина контрастує з фоном. На момент аерознімання фенологічна фаза розвитку борщівника Сосновського характеризується початком інтенсивного вегетативного росту. Рослина активно нарощує біомасу. Листки мають виражене розчленування, ширина крони досягає 1 м.

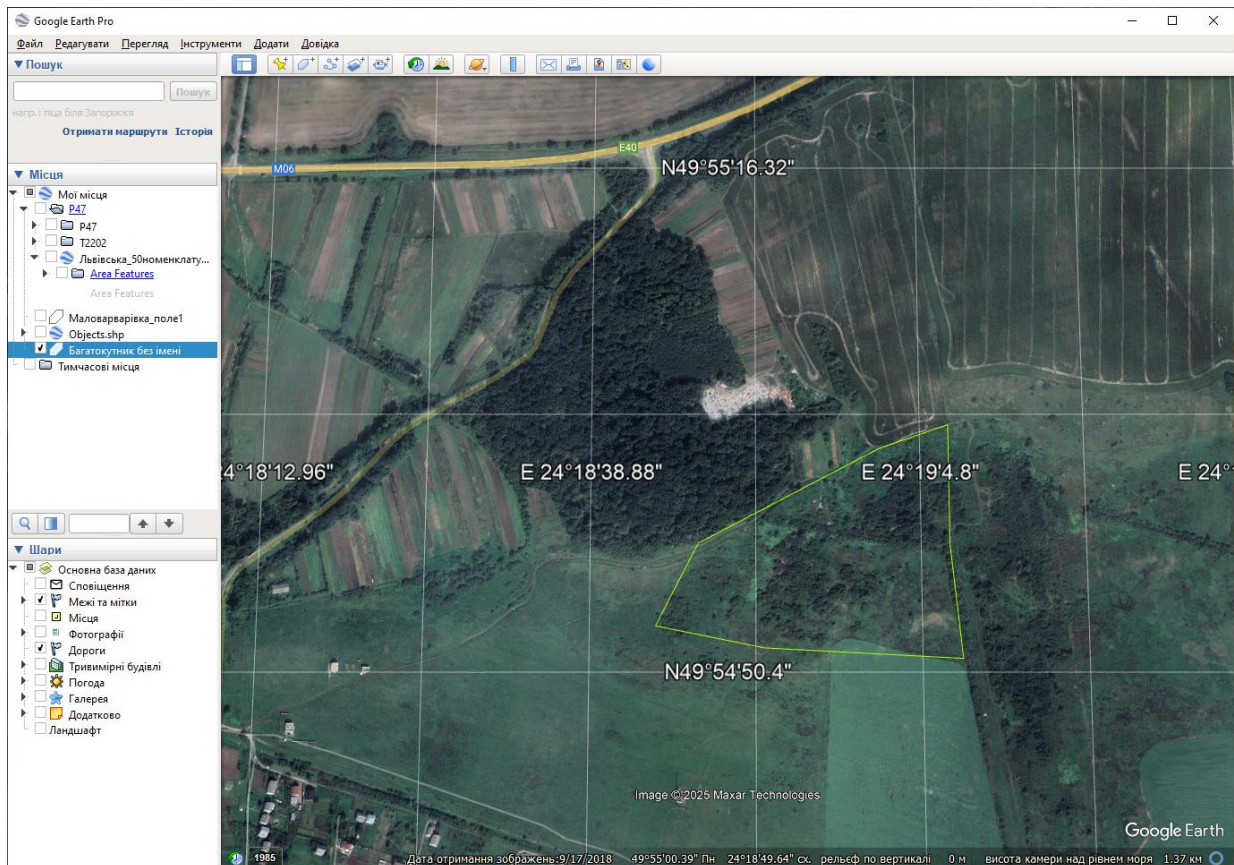


Рис.3.5. Територія дослідження

Для збору достовірних даних усі польоти проводилися відповідно до рекомендацій передпольотного планування (<https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/224893167-Best-practices-Collecting-Data-with-MicaSense-RedEdge-and-Parrot-Sequoia>). Для виконання експериментальних робіт використане таке обладнання та технічні засоби:

1. Безпілотний літальний апарат вертолітного типу DJI Phantom 4 Pro RTK з такими основними характеристиками:
 - маса: 1,38 кг;
 - GPS/GLONASS-навігація та визначення координат центрів проєкцій аерознімків в RTK режимі;
 - максимальна швидкість польоту: 20 м/с;
 - час польоту: до 30 хв;
 - автоматичне планування маршрутів у додатку DJI GS Pro;
 - підтримка RTK/PPK.

- RGB-камера 20 Мп, CMOS 1", фокусна відстань 24 мм, механічний затвор;
- мультиспектральний модуль (Red, Green, Blue, RedEdge, NIR).

Аерознімання виконане 4 травня 2023 року з розрахунковим просторовим розрізненням GSD при висоті польоту 60 м: 2,3 см/пікс.

Розрахунок розміру проекції пікселя на земну поверхню(GSD) за формулою:

$$GSD = \frac{H \times S}{f \times I} \quad (3.1)$$

де:

H — висота польоту (м),

S — розмір сенсора (мм),

f — фокусна відстань камери (мм),

I — розмір пікселя сенсора (мкм).

Маршрути польоту формувалися у програмному забезпеченні DJI GS Pro.

Основні параметри:

- висота польоту: 100 м;
- поздовжнє перекриття: 85%;
- поперечне перекриття: 75%;
- швидкість польоту: 4–6 м/с;
- зйомка в надир, кут нахилу камери 90°.

Всього отримано 90 мультиспектральних аерознімки та 101 RGB аерознімок.

3.3. Фотограмметричне опрацювання аерознімків

Фотограмметричне опрацювання мультиспектральних аерознімків з БПЛА виконувалось в програмі Pix4Dmapper. Метою є створення ортофотопланів, цифрової моделі поверхні рослинності та ґрунту, растрових карт вегетаційних індексів.

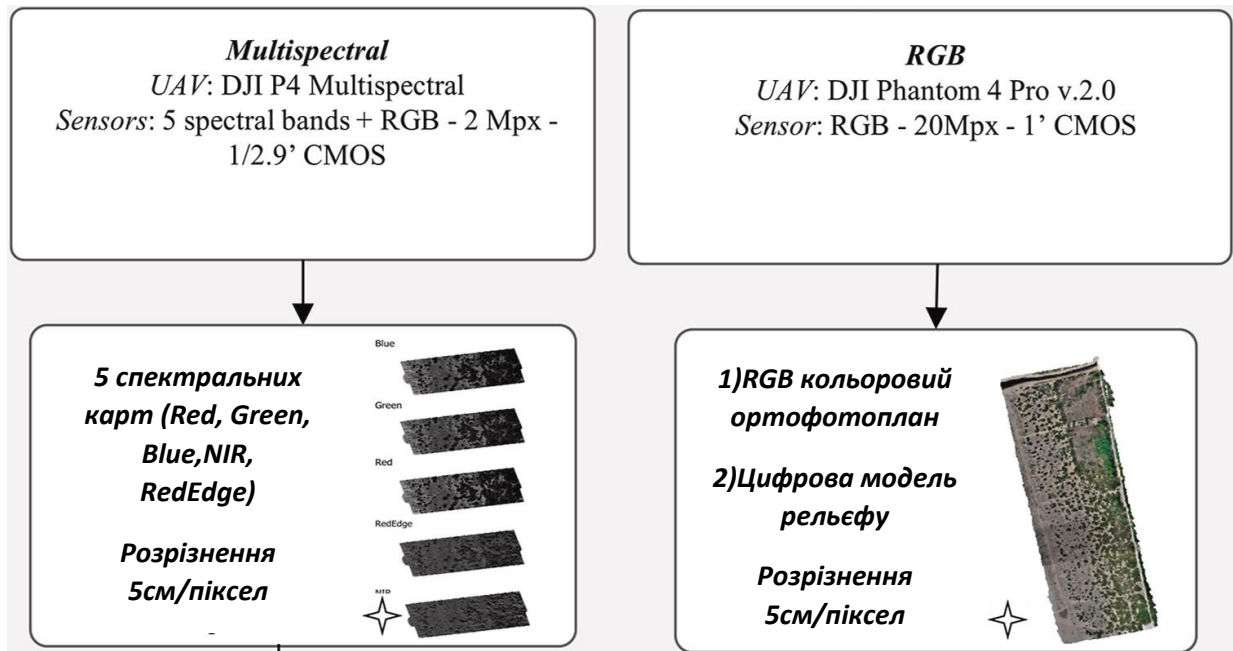


Рис.3.6. Фотограмметричне опрацювання аерознімків

Порядок цього процесу наступний.

1. Створення нового проєкту в Pix4D:

- Створюється файл проєкту з вказанням назви та директорії. У вікні налаштувань вказуємо: **Template** → *Ag Multispectral* або *Ag RGB + NIR*;
- Імпортуються всі мультиспектральні аерознімки в проєкт. Pix4D автоматично розпізнає сенсор і зчитує файл телеметрії знімання.

2. Перший етап опрацювання — **Initial Processing**. Pix4D виконує в автоматичному режимі:

- Виявлення ключових точок (keypoints) на знімках;
- Співставлення відповідних точок (Матчінг) між знімками;

- Розрахунок внутрішнього та зовнішнього орієнтування;
- Побудова розрідженої хмари 3D-точок.

3. Другий етап опрацювання — **Point Cloud and Mesh:**

- Генерація щільної хмари точок (Dense Points Cloud);
- Класифікація хмари точок (ground / vegetation / buildings).

4. Третій етап опрацювання - **DSM, DTM, Orthomosaic.** Pix4D створює основні продукти (GeoTIFF):

- **DSM — Digital Surface Model.** Побудова 3D-моделі (растрова та тріангуляційна TIN видимої поверхні за всіма спектральними каналами);
- **DTM — Digital Terrain Model.** Побудова 3D-моделі (растрова та тріангуляційна TIN поверхні рельєфу, очищення поверхні DSM від рослинності та об'єктів);
- **Multispectral Orthomosaic** - Ортомозаїки за яскравостями розрізі каналів (Red, Green, Blue, RE, NIR).

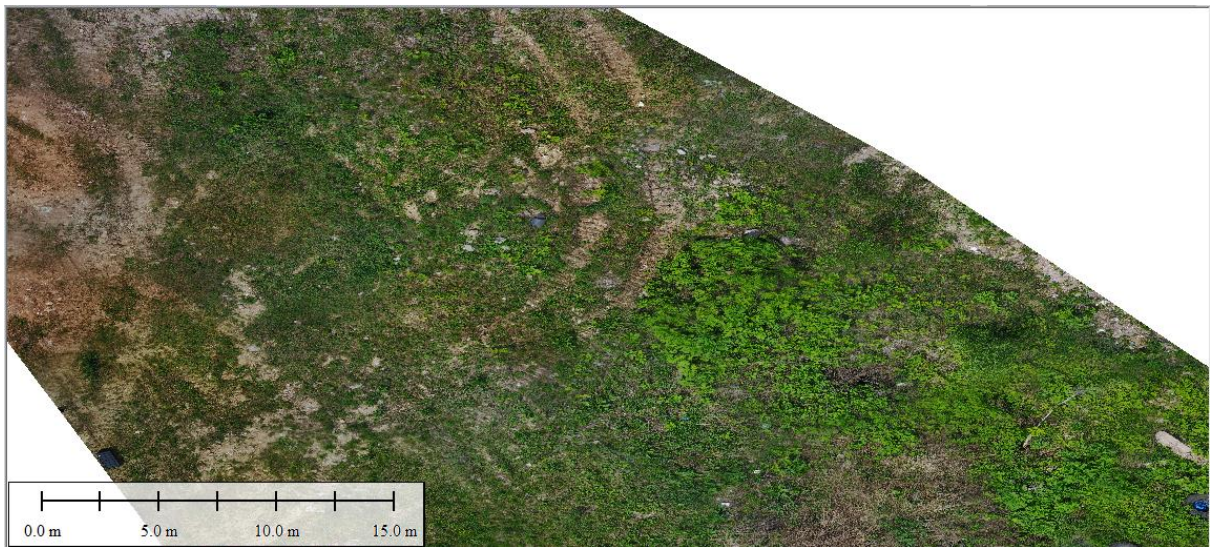


Рис.3.7. Фрагмент створеного ортофотоплану дослідної ділянки (RGB, у натуральних кольорах)

- **Растрові карти вегетаційних індексів (GeoTIFF):**
 - NDVI
 - NDRE

- GNDVI
- MCARI
- SIPI
- VARI
- OSAVI
- Інші індекси за вибором користувача.

Опрацювання знімків в програмі PIX4D завершується створенням звіту про якість (Quality Report) у форматі PDF.

Результатом фотограмметричного опрацювання стали карти вегетаційних індексів (NDVI та інших) із просторовою роздільністю 5 см, що дозволяє ідентифікувати навіть невеликі групи рослин та окремі рослини борщівника на ранніх стадіях вегетативного розвитку.

3.4. Геоінформаційний аналіз карт вегетаційного індексу

Геоінформаційний аналіз карти вегетаційного індексу є ключовим етапом у процесі просторової оцінки стану рослинного покриву та визначення на території локацій проростання інвазивних видів, зокрема борщівника Сосновського. Створення карти вегетаційних індексів на основі мультиспектральних аерознімків з БПЛА дозволяє не лише кількісно оцінити біофізичні характеристики рослинності, але й виконати її детальне просторове структурування, що є необхідною передумовою для подальшої класифікації та картографування інвазійних осередків.

Після створення карт вегетаційних індексів проведено низку ГІС-операцій для просторової інтерпретації стану рослинності. Зокрема до карти індексу NDVI нами застосовано такі методи:

- Класифікація по методу Natural Breaks (Jenks) – для природного групування значень;

- Порогова класифікація карти за значеннями індексу, характерними для життєвих стадій борщівника:
 - $\{0,6-0,8\}$ – високопродуктивні ділянки з потенційною присутністю борщівника;
 - $\{0,4-0,6\}$ – змішана рослинність, типова для узлісь та злакових угруповань;
 - $<0,3$ – деградовані території, відкритий ґрунт або ділянки без живої рослинності.

Порівняльний аналіз із польовими даними підтвердив, що борщівник Сосновського найчастіше відображається у діапазоні значень індексу NDVI 0,55–0,75 на цій стадії вегетації та розвитку щільності листя.

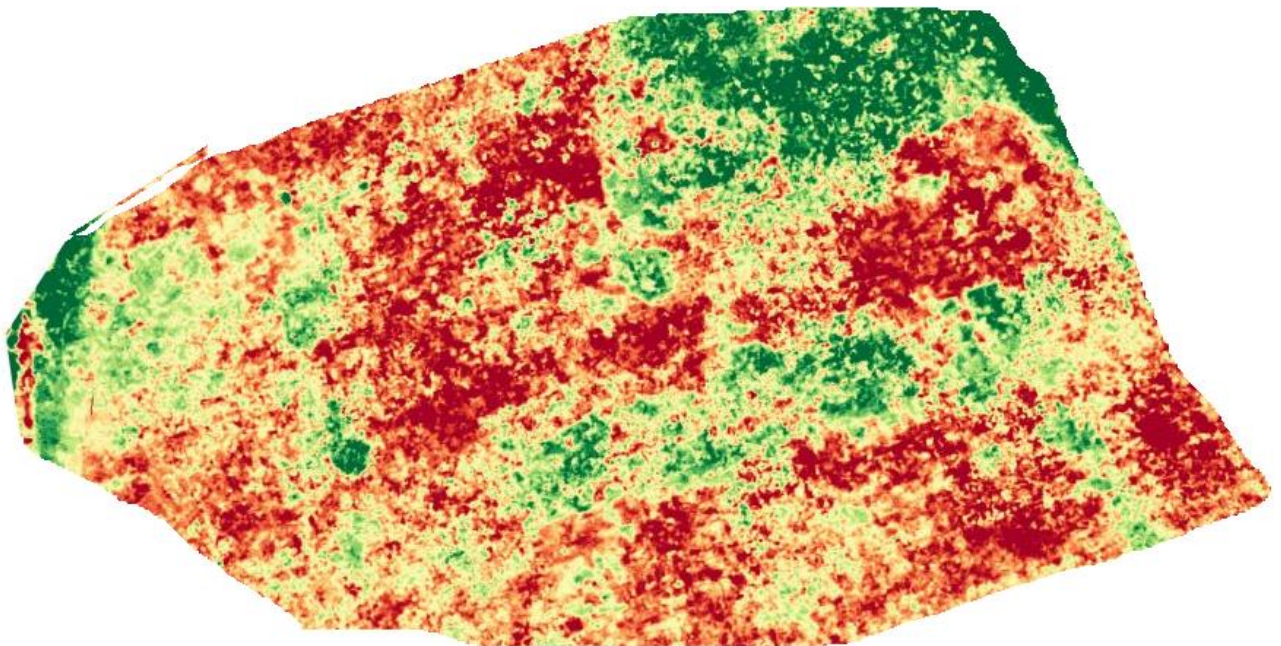


Рис.3.8. Класифікована карта досліджуваної ділянки з позначеними ділянками росту борщівника (яскраво-зелений колір)

Щоб точніше виділити суцільні плями борщівника, отримані карти вегетаційних індексів було використано як один із ключових шарів у методі об'єктної класифікації OBIA. Це дозволило розрізняти борщівник не лише за

спектральним відгуком, але й за морфологічними ознаками (форма куртини, щільність масиву).

Таким чином, геоінформаційний аналіз карт вегетаційних індексів довів свою високу ефективність для ідентифікації осередків інвазії борщівника Сосновського.

Результати експериментальних робіт демонструють потенціал поєднання технології мультиспектрального аерознімання з БПЛА з геоінформаційним аналізом карт вегетаційних індексів для масштабованого в просторі і часі, економічно ефективного моніторингу навколишнього середовища. Це дослідження сприяє розвитку інновацій у збереженні навколишнього середовища та боротьбі з інвазивними видами.

Розділ 4. Охорона довколишнього середовища

У сучасному природоохоронному менеджменті безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають надзвичайно ефективним інструментом для збору просторових даних високої роздільної здатності. За своєю гнучкістю, низькою вартістю відносно пілотованих літаків та оперативною здатністю, дрони відкривають нові можливості для моніторингу біорізноманіття, оцінки стану екосистем, картування загроз і планування природоохоронних заходів.

Метою цієї роботи є аналіз потенціалу даних, зібраних за допомогою БПЛА, для підтримки процесів планування природоохоронних дій. У ній розглядаються методи збору, обробки та валідації даних, а також їх інтеграція з ГІС (геоінформаційними системами) і підходи до прийняття рішень на основі отриманих просторових моделей.

Методи

У дослідженні аналізуються такі підходи:

- **Фотограмметрія** — використання БПЛА для створення ортофотопланів і тривимірних моделей рельєфу (Цифрових Моделей Рельєфу, DEM), що дає змогу точно картографувати ландшафт, уклони, ерозійні зони й водозбірні басейни. Наприклад, за допомогою БПЛА можна побудувати високоточний DEM для прируслових територій із складною гідрорельєфною структурою.
- **Мультиспектральна зйомка та індекси вегетації** — оснащення дронів мультиспектральними камерами дозволяє отримувати канали, які корисні для розрахунку індексів рослинності (наприклад, NDVI). Ці індекси допомагають ідентифікувати зони деградації, визначати здоров'я рослинного покриву, виявляти цінні екологічні ділянки та спрямовувати заходи з охорони.
- **Обробка даних і ГІС-аналітика** — після збору даних формується база просторових шарів: ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу, карти

покривів рослинності та індексні карти. Потім ці дані інтегруються до ГІС для просторового аналізу, моделювання змін, пріоритизації територій та розробки сценаріїв втручання.

- **Моделювання й планування заходів** — на основі зібраних даних створюються карти ризику (наприклад, ерозії, деградації рослинності), визначаються пріоритетні ділянки для реставрації, контрольних природоохоронних заходів або моніторингу.
- **Оцінка впливу на біорізноманіття** — дрони використовуються для спостереження за дикими видами: наприклад, вони можуть знімати гнізда птахів (рапторів), що важливо для збереження таких популяцій. Також існують дослідження, які комбінують зображення з дронів з тепловізійними сенсорами або глибоким навчанням для виявлення тварин й аналізу їх діяльності.

При використанні БПЛА також враховуються ризики та етичні питання: вплив шуму дрона на дику природу, оптимізація траєкторій польоту для мінімізації стресу тварин, вибір висоти польоту та швидкості.

Результати та переваги

Аналіз показує, що дані з БПЛА значно підвищують ефективність планування природоохоронних заходів:

- **Просторова точність і деталізація:** завдяки високій роздільній здатності знімків, можливо створювати детальні карти ландшафту, відстежувати зміни мікрорельєфу, зону ерозії, заповнюваність водних артерій, що є критичними для планування реставрації та захисту.
- **Оперативність і гнучкість:** дрони можуть швидко виконати зйомку важкодоступних або віддалених територій навіть після погодних подій або стихій, що дозволяє вчасно реагувати на екологічні загрози.
- **Економічна ефективність:** порівняно з традиційними методами польових обстежень, використання БПЛА дозволяє зняти великі території з меншими витратами часу та людських ресурсів.

- **Адаптивне управління:** інтегруючи дані БПЛА в ГІС, можна моделювати різні сценарії природоохоронних дій, проводити просторовий аналіз динаміки змін, і планувати пріоритетні втручання на основі науково обґрунтованих карт ризику.
- **Моніторинг біорізноманіття:** можливість використання мультиспектральних, теплових сенсорів або відео для відстеження тваринних популяцій, гніздування птахів, порушень середовища або незаконної діяльності (наприклад, браконьєрства) робить дрони важливою частиною системи охорони природи.

Виклики та обмеження

Незважаючи на переваги, існують певні обмеження та питання, які необхідно враховувати:

- **Етичні та екологічні ризики:** часті польоти або неправильно налаштовані траєкторії можуть спричиняти стрес у дикої природи. Найкращі практики потребують розробки стандартів роботи з дронами, оптимізації висоти, маршруту, часу польоту.
- **Обробка великих обсягів даних:** аерозйомка генерує великі масиви зображень, які потребують обчислювальних ресурсів для фотограмметричної обробки, створення ортоформ, DEM, індексних карт і подальшого просторового аналізу.
- **Геоприв'язка й точність:** для отримання високоякісних моделей потрібна точна геоприв'язка (визначення ґрунтових контрольних точок — GCP), що може бути складним завданням у віддалених або важкодоступних місцях.
- **Регуляторні обмеження:** експлуатація БПЛА іноді підпадає під регуляції повітряного простору, особливо у заповідних або охоронних зонах; необхідно дотримуватися законодавства, отримувати дозволи.
- **Вартість обладнання:** високоточні сенсори (мультиспектральні, теплові, LiDAR) можуть бути дорогими; також потрібні спеціалізовані програмні засоби й навички для обробки даних.

Перспективи розвитку

На основі огляду літератури та аналізу поточних застосувань пропонуються наступні напрямки розвитку:

- **Інтеграція штучного інтелекту:** використання алгоритмів машинного навчання та глибокого навчання (наприклад, нейронні мережі) для автоматичного розпізнавання видів, зміни рослинного покриву, виявлення порушень тощо.
- **Розширення сенсорної бази:** застосування LiDAR, гіперспектральних камер, теплових датчиків для підвищення інформативності та точності екологічного моніторингу.
- **Автономні системи польоту:** впровадження автономних дронів з програмованими маршрутами, тривалою роботою, а також дронів, які можуть самостійно повертатися для зарядки або передавати дані.
- **Співпраця між науковцями, урядовими та природоохоронними організаціями:** створення спільнот практики, стандартів (протоколів), навчальних платформ для підвищення кваліфікації фахівців, обміну даними та методами.
- **Політична та регуляторна підтримка:** розробка національних стратегій впровадження БПЛА для охорони природи, адаптація правил повітряного простору, фінансування пілотних проектів та масштабних кампаній з моніторингу.

Таким чином, використання даних, зібраних за допомогою БПЛА, має значний потенціал для підвищення ефективності планування природоохоронних заходів. Завдяки високій просторовій роздільній здатності, гнучкості збору даних та інтеграції з ГІС, дрони дозволяють створювати точні карти, моделювати сценарії втручання, вчасно реагувати на загрози та оптимізувати ресурси. Однак, щоб повністю реалізувати цей потенціал, необхідно вирішити питання етики, обробки даних, регуляторних бар'єрів і вартості. Перспективні напрямки — це

застосування штучного інтелекту, автономних систем польоту, нових сенсорів та тісна співпраця між науковою спільнотою і природоохоронними структурами.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було всебічно досліджено можливості застосування геоінформаційних технологій та аерознімків з безпілотних літальних апаратів для виявлення, аналізу та моніторингу поширення інвазивних рослинних видів, зокрема борщівника Сосновського. Проведене дослідження підтвердило високу ефективність сучасних методів дистанційного зондування та просторового аналізу для оперативного екологічного контролю територій.

1. Проаналізовано спектральні особливості борщівника Сосновського, що дозволило визначити методику його дистанційної ідентифікації. Підтверджено, що поєднання мультиспектральних каналів, спектральних індексів (зокрема NDVI та спеціалізованих індексів), разом із алгоритмами машинного навчання, забезпечує високу точність виділення інвазійних осередків.
2. Зібрано набори вхідних даних, включаючи мультиспектральні аерофотознімки з БПЛА високої просторової роздільної здатності.
3. Виконано фотограмметричну обробку аерознімків, у ході якої сформовано ортофотоплани, цифрову модель рельєфу та цифрову модель поверхні. Ці дані стали основою для просторової інтеграції та подальшого тематичного картографування рослинності.
4. Побудовано карти локалізації борщівника на основі спектральних індексів. Геоінформаційний аналіз карт вегетаційних індексів довів свою високу ефективність для ідентифікації осередків інвазії борщівника Сосновського.

Отримані результати підтвердили, що застосування геоінформаційних технологій у поєднанні з високодетальними аерознімками БПЛА є одним із найефективніших інструментів для оперативного та високоточного картографування борщівника Сосновського. Запропонована методика може бути

адаптована й для контролю інших інвазивних рослинних видів, що робить її універсальним інструментом екологічного моніторингу та управління природними ресурсами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борщівник Сосновського та відповідальність за невжиття заходів по боротьбі з ним/ Опубл.: 10.10.2024. Головне управління Держгеокадастру у Закарпатській області. URL: <https://zakarpatska.land.gov.ua/borshhivnyk-sosnovskogo-ta-vidpovidalnist-za-nevzhyttya-zahodiv-po-borotbi-z-nym/>
2. Глобальний реєстр інтродукованих та інвазивних видів - Україна. URL: <https://www.gbif.org/dataset/d006d8bb-cf1e-46ff-a054-c6768e23d86d>
3. Іваненко Р., Марченко О. (2024). Використання дронів у природокористуванні. Herald of Khmelnytskyi National University, Technical Sciences, 339(4), -2024. pp.359-367
4. Кохан С.С., Востоков А.Б., Леонтьєв О.О. Дистанційне зондування Землі. – Київ: МП “ЛЕСЯ”. –2010. – 300 с.
5. Методичні рекомендації щодо оцінки наявного і потенційного впливу (ризиків) інвазійних чужорідних видів. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 15 березня 2024 року № 290. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0290926-24?utm_source=chatgpt.com#Text
6. Пестова І.О. Методика оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / І.О Пестова. // Національна академія наук України, Київ. – 2015. – 172 с.
7. Про затвердження програми боротьби з борщівником Сосновського на 2022 рік на території Белзької міської ради. Белзька міська Рада Львівської області. XX чергова сесія VIII скликання. Рішення від 14 липня 2022 року № 616. м.Белз. URL: <https://www.belztg.gov.ua/rishennia-sesiii/stor-650>
8. Програма моніторингу, локалізації та контролювання чисельності чужорідних (інвазивних) видів рослин на території територіальної громади Стрийської міської ради на період 2021-2025 років. Стрийська міська Рада

Львівської області/ XVII Сесія, VIII Демократичного скликання. Рішення від 27 січня 2022 року м.Стрий № 916.

9. Протокол про збереження і стале використання біологічного та ландшафтного різноманіття до Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат, підписаної в м. Київ 22 травня 2003 р. Чеська Республіка, Угорщина, Польща, Румунія, Сербія, Словаччина, Україна; Протокол, Міжнародний документ від 19.06.2008 URL:
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/998_366/ed20100428/find?text=%B2%ED%E2%E0%E7%E8%E2%ED%B3+%F7%F3%E6%EE%F0%B3%E4%ED%B3+%E2%E8%E4%E8
10. Фітосанітарний статус борщівника Сосновського – отруйної рослини, небезпечної для людей/ Опубл.: 11.04.2018. Головне управління Держпродспоживслужби в Рівненській області URL:
<https://www.rivneprod.gov.ua/2018/04/11/fitosanitarnyj-status-borshhivnyka-sosnovskogo-otrujnoyi-roslyny-nebezpechnoyi-dlya-lyudej/>
11. Alexander Menshchikov et al. Real-time Detection of Hogweed: UAV Platform Empowered by Deep Learning, IEEE Transactions on Computers (2021). DOI: [10.1109/TC.2021.3059819](https://doi.org/10.1109/TC.2021.3059819)
12. Amira Mouakher, Bechir Ben Tekfa, Naeem Ayoub, Samira El Yacoubi. (2025). Enhancing Precision Agriculture: UAV-Based Detection and Management of Giant Hogweed, Procedia Computer Science, Volume 270, 2025, Pages 2868-2877, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.409>
[.\(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050925030820\)](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050925030820)
13. Ashikhmina T. Ya., Rutman V. V., Adamovich T. A., Tovstik E. V. (2023). Monitoring the distribution of *Heracleum sosnowskyi* in urban areas based on Earth remote sensing data. Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. pp. 73-80.
14. Bogdanov V., Osipov A., Garmanov V., Efimova G., Grik A., Zavarin B., Terleev V. and Nikonorov A. (2021). Problems and monitoring the spread of the ecologically dangerous plant *Heracleum Sosnowskyi* in urbanized areas and

- methods to combat it. E3S Web of Conferences 258, 08028 (2021) UESF-2021
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125808028>
15. Bowlby B. Caught on camera: Invasive species monitored using satellite imagery and AI. Biotechniques. – URL: <https://www.biotechniques.com/plant-climate-science/caught-oncamera-invasive-species-monitored-using-satellite-imagery-and-ai>
 16. Fiston Nininahazwe, Jérôme Théau, Genest Marc Antoine & Mathieu Varin. (2023). Mapping invasive alien plant species with very high spatial resolution and multi-date satellite imagery using object-based and machine learning techniques: A comparative study, *GIScience & Remote Sensing*, 60:1, 2190203, DOI: 10.1080/15481603.2023.2190203 URL: <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2190203>
 17. Gonzales D, Hempel de Ibarra N and Anderson K (2022) Remote Sensing of Floral Resources for Pollinators – New Horizons From Satellites to Drones. *Front. Ecol. Evol.* 10:869751. doi: 10.3389/fevo.2022.869751
 18. Henrik Battke, Klaus Schneider-Zapp. Seeing the Invisible Multispectral Image Analysis in Arable Farming.
 URL: https://data.pix4d.com/misc/KB/documents/Pix4D_White_paper_Seeing+the+Invisible%E2%80%93Multispectral+Image+Analysis+in+Arable+Farming.pdf
 19. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) — «Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control». URL: <https://www.unep.org/resources/report/invasive-alien-species-report>
 20. Khomiak, I. & Onyshchuk, I. & Vakerych, M. & Hasynech, Y.. (2024). Adaptation strategies of *Heracleum sosnowskyi* in Ukrainian Polissia. *Biosystems Diversity*. 32. 99-106. 10.15421/012409
 21. Lachuga, Yu F., et al. The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture. *Mach. Equip. Rural. Area*, 2022, 4: 2-6

22. Lipińska, H., Lipiński, W., Shuvar, I., Korpita, H., & Shuvar, A. (2023). Invasive plant species and their threat to biodiversity. *Plant and Soil Science*, 14(1), 51-65. <https://doi.org/10.31548/plant1.2023.51>
23. Mouakher, Amira & Tekfa, Bechir & Ayoub, Naeem & El Yacoubi, Samira. (2025). Enhancing Precision Agriculture: UAV-Based Detection and Management of Giant Hogweed. *Procedia Computer Science*. 270. 2868-2877. 10.1016/j.procs.2025.09.409.
24. Nininahazwe, F., Théau, J., Marc Antoine, G., & Varin, M. (2023). Mapping invasive alien plant species with very high spatial resolution and multi-date satellite imagery using object-based and machine learning techniques: A comparative study. *GIScience & Remote Sensing*, 60(1). <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2190203>
25. Raeva, P. L., Šedina, J., & Dlesk, A. (2018). Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV. *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup1), 192–201. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1527661>
26. Reinprecht, V., & Kieffer, D. S. (2025). Application of UAV Photogrammetry and Multispectral Image Analysis for Identifying Land Use and Vegetation Cover Succession in Former Mining Areas. *Remote Sensing*, 17(3), 405. <https://doi.org/10.3390/rs17030405>
27. Ryzhikov, D. (2017). Heracleum Sosnowskyi Growth Area Control by Multispectral Satellite Data. *Information and Control Systems*, (6), 43-51. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.6.43>
28. Turénko D., & Khan, Adil & Hussain, Rasheed & Ali, Syed. (2020). Oversampling Versus Variational Autoencoders: Employing Synthetic Data for Detection of Heracleum Sosnowskyi in Satellite Images. 10.1007/978-981-15-1465-4_40