

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
Факультет агротехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. каф. геоекології і землеустрою
доцент _____ Максим ГАНЧУК
“_16_” червня 2025 р.

Пояснювальна записка
до дипломної роботи здобувача СВО Бакалавр
(ступінь вищої освіти)

на тему: **«Використання ДЗЗ для аналізу стану наземних екосистем»**

13 ГЗ Д 003 000000 ПЗ

Виконав: здобувачка ВО 4 курсу, групи 41 ЕК
спеціальності 101 Екологія за ОПП Екологія
(шифр і назва спеціальності та ОПП)

Здобувач вищої освіти _____ Валерія ОЛЬХОВСЬКА
(підпис) (П.І.П)

Керівник, доцент _____ Максим ГАНЧУК
(підпис) (П.І.П)

Консультант, доцент _____ Михайло ЗОРЯ
(підпис) (П.І.П.)

Нормоконтроль, доцент _____ Максим ГАНЧУК
(підпис) (П.І.П)

Запоріжжя - 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

Інститут або факультет агротехнологій та екології
Кафедра геоекології і землеустрою

Ступінь вищої освіти Бакалавр
Галузь знань 10 «Природничі науки»

Спеціальність 101 «Екологія»

Освітня програма «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ГЕЗ
к.с.-г.н., доцент Максим ГАНЧУК
« 16 » вересня 2024 р

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

студенту Ольховській Валерії Віталіївні

1. Тема роботи **Використання ДЗЗ для аналізу стану наземних екосистем**

керівник роботи к.с.-г.н., доцент Ганчук Максим Миколайович

Затверджені наказом Ректора університету від «22» жовтня 2024 р. № 506-С

Строк подання студентом роботи «30» травня 2025 р.

Вихідні дані до роботи дані відділу статистики та ДСНС, чинне законодавство України та ЄС, данні ДЗЗ.

Перелік питань, які потрібно розробити: сучасні методи та технології дистанційного зондування Землі для моніторингу агроекосистем; ключові показники стану агроекосистем, які можуть бути оцінені за допомогою ДЗЗ; ефективність використання різних джерел супутникових даних (оптичних, радарних, мультиспектральних) для аналізу агроекосистем; аналіз агроекосистем на основі супутникових знімків.

-Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав (дата)	завдання прийняв
Розділ 5 Охорона праці	Михайло ЗОРЯ, к.т.н., доцент, завідувач кафедри цивільної безпеки	16.09.2024	16.09.2024

Дата видачі завдання

16.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи (місяць)	Відмітка керівника про виконання (засвідчується підписом)
Розділ 1. Сучасні методи та технології дистанційного зондування Землі для моніторингу агроєкосистем	листопад	Виконано
Розділ 2. Ключові показники стану агроєкосистем, які можуть бути оцінені за допомогою ДЗЗ	грудень	Виконано
Розділ 3. Ефективність використання різних джерел супутникових даних (оптичних, радарних, мультиспектральних) для аналізу агроєкосистем	березень	Виконано
Розділ 4. Аналіз агроєкосистем на основі супутникових знімків	квітень	Виконано
Розділ 5. Охорона праці	травень	Виконано
Висновки	травень	Виконано

Студентка _____, В.В. Ольховська
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи М.М. Ганчук
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Ольховська В.В. Використання ДЗЗ для аналізу стану наземних екосистем. Бакалаврська робота. Кафедра геоекології і землеустрою. Запоріжжя, Таврійський ДАТУ ім. Д. Моторного, 2025. С.73

Текст викладений на 68 сторінках, містить 5 розділи, 6 таблиць, 39 рисунків, 13 літературних джерела.

Актуальність теми дослідження

В умовах активних бойових дій, глобальних кліматичних змін, зростаючого антропогенного навантаження та потреб у продовольчій безпеці питання ефективного моніторингу стану агроєкосистем набуває особливої актуальності. Агроєкосистеми, як складні природно-антропогенні утворення, потребують постійного спостереження, аналізу та адаптивного управління.

Одним із найбільш ефективних та перспективних інструментів для спостереження за динамікою та станом агроландшафтів є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). Завдяки регулярності, широкому спектру даних та високій роздільній здатності, технології ДЗЗ дозволяють отримувати актуальну та об'єктивну інформацію про різноманітні показники стану наземного покриву.

Сучасні методи аналізу супутникових даних, у поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС), створюють потужне аналітичне середовище для безперервного моніторингу агроєкосистем. Це надає нові можливості для оптимізації землекористування, вчасного виявлення негативних процесів.

Результати дослідження можуть бути корисними для фахівців у галузях екології, агрономії, регіонального планування та геоінформатики, а також для прийняття рішень щодо сталого управління сільськогосподарськими ресурсами.

Мета роботи: використання методичних підходів до наявних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для оцінки та моніторингу стану агроєкосистем з метою підвищення ефективності їх управління.

Ключові слова: екосистема, агроландшафт, геоінформаційні системи, дистанційне зондування Землі, моніторинг.

Зміст

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ АГРОЕКОСИСТЕМ.	10
1.1. Супутникове дистанційне зондування.....	11
1.2. Аерозйомка з дронів (БПЛА).....	19
1.3. Спектральні індекси.....	21
1.4. Тепловізійне та гіперспектральне зондування.....	23
1.5. ГІС-технології та штучний інтелект	27
РОЗДІЛ 2. КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ СТАНУ АГРОЕКОСИСТЕМ, ЯКІ МОЖУТЬ БУТИ ОЦІНЕНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЗЗ.	32
2.1. Вегетаційні індекси NDVI, EVI, SAVI.....	32
2.2. Біомаса та продуктивність рослин.	36
2.3. Вологість ґрунту.....	40
2.4. Рослинний покрив.	42
2.5. Поширення хвороб та шкідників.....	45
2.6. Зони ерозії ґрунтів.....	49
РОЗДІЛ 3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ (ОПТИЧНИХ, РАДАРНИХ, МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ) ДЛЯ АНАЛІЗУ АГРОЕКОСИСТЕМ.	51
3.1. Оптичні дані.....	51
3.2. Радарні дані (SAR).	54
3.3. Мультиспектральні дані.	57
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ АГРОЕКОСИСТЕМ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ.	61
4.1. Характеристика чорноземів Маловиськівського району Кіровоградської області	61
4.2. Побудова тематичної карти деградаційних процесів.....	64
4.2.1. Обробка знімків.....	65
4.2.2. Побудова карти.	66
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	74

ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

ВСТУП

Актуальність теми. У контексті сучасних викликів, що постають перед Україною, тема використання дистанційного зондування Землі для моніторингу стану наземних екосистем набуває виняткової актуальності. Війна, що триває на території країни, спричиняє серйозні екологічні наслідки: забруднення ґрунтів, знищення сільськогосподарських угідь, зміну структури землекористування, деградацію земель та втрату екологічної рівноваги. У таких умовах особливо важливо мати оперативні, достовірні й масштабні інструменти для оцінки поточного стану агроекосистем — саме технології ДЗЗ є найбільш ефективним рішенням.

Завдяки супутниковим спостереженням можливо моніторити великі території, навіть ті, що знаходяться у зонах з обмеженим доступом через бойові дії. Це дозволяє оперативно виявляти пошкодження екосистем, аналізувати динаміку змін у рослинному покриві, вологозабезпеченні та деградації земель, а також здійснювати оцінку екологічної шкоди.

Крім того, аграрний сектор є одним із ключових в економіці України, і підтримка його ефективного функціонування — це стратегічно важливе завдання. Моніторинг стану посівів, прогнозування врожайності, контроль за станом ґрунтів — усе це можливе завдяки ДЗЗ, навіть в умовах часткової відсутності польових спостережень.

Також варто зазначити, що після завершення активної фази бойових дій Україна потребуватиме комплексної екологічної оцінки ушкоджених територій для планування відновлення. ДЗЗ стане базовим інструментом у цій роботі: від картографування забруднень до оцінки потенціалу відновлення земель сільськогосподарського виробництва.

Таким чином, у нинішніх умовах дистанційне зондування Землі є не лише інструментом наукового аналізу, а й життєво необхідною технологією для забезпечення продовольчої стабільності, екологічної безпеки та відновлення післявоєнної України.

Метою дипломної роботи є використання методичних підходів до наявних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для оцінки та моніторингу стану агроєкосистем з метою підвищення ефективності їх управління.

Для досягнення поставленої мети поставлено наступні **завдання**:

проаналізувати сучасні методи ДЗЗ для вирішення питань моніторингу екосистем;

визначити основні показники агроландшафтів, що можуть бути проаналізовані за допомогою ДЗЗ;

провести аналіз агроландшафтів Маловиськівського району Кіровоградської області за допомогою даних ДЗЗ.

Об'єктом дослідження є агроєкосистеми як складні природно-антропогенні системи, що зазнають впливу природних і антропогенних факторів.

Предметом дослідження даної дипломної роботи є методи та технології дистанційного зондування Землі, що застосовуються для оцінки стану агроєкосистем, екологічної стійкості, аналізу їх продуктивності та впливу зовнішніх факторів.

Методи застосовані у дослідженні поєднують сучасні технології дистанційного зондування Землі, статистичної обробки даних, геоінформаційного аналізу та просторового моделювання. Основу становить аналіз супутникових знімків різного типу (оптичних, радарних, мультиспектральних), які дозволяють оцінити зміни в стані рослинного покриву, ґрунтів та інших компонентів агроєкосистем.

Застосовуються також методи векторизації, класифікації та індексного аналізу (наприклад вегетаційних індексів), які дають змогу об'єктивно вимірювати стан екосистем за певними показниками. Геоінформаційні системи (ГІС) використовуються для просторової обробки, інтеграції даних та візуалізації. Додатково застосовуються аналітичні та порівняльні методи для оцінки ефективності різних джерел супутникової інформації та динаміки змін у досліджуваних регіонах.

Загальна база досліджень є комбінованою, та складається з супутникові знімки (оптичні та радарні), кліматичних показників, вегетаційних індексів, цифрових моделей рельєфу та просторових шарів землекористування. Дані зібрані з

відкритих джерел (Sentinel, Landsat, Google Earth Engine та ін.) і організовані у форматі, придатному для обробки в геоінформаційних системах. База даних дозволяє проводити аналіз динаміки стану агроєкосистем у часовому та просторовому аспектах.

Апробація результатів. Ганчук Максим, Скиба Вікторія, Ольховська Валерія
Використання даних супутникового моніторингу для виявлення лісових пожеж в результаті ведення бойових дій. Інформаційні технології у сфері захисту довкілля: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 16–17 травня 2024 р. Навчально-науковий Інститут просторового планування та перспективних технологій Національного університету «Львівська політехніка». Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2024. Ст. 94-96

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ АГРОЕКОСИСТЕМ.

В загальному розумінні дистанційне зондування це «наука та технологія за допомогою яких характеристики об'єктів інтересу можуть ідентифікуватись, вимірюватись та аналізуватись за відсутності безпосереднього контакту» (за JARS, 1993 р.).

У вузькому розумінні дистанційне зондування – це вимірювання енергії, що випромінюється від земної поверхні. Агроекосистеми України є глобально важливим виробником продовольчих ресурсів і продовольчої безпеки багатьох інших країн. Зміни клімату, раціональне використання наявного агроресурсного потенціалу України, необхідність адаптувати аграрне виробництво до нових умов, актуалізація інформаційної підтримки та цифрової трансформації аграрного виробництва потребують якісного вдосконалення науково-методичних засад агроекологічного моніторингу з використанням супутникових даних.

В умовах сучасності дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) стало одним із ключових інструментів для оцінки стану природного середовища, зокрема агроекосистем. Завдяки супутниковим та авіаційним технологіям стало можливим оперативно отримувати об'єктивні дані про великі території без необхідності постійних польових спостережень.

Супутниковий моніторинг стану природних ресурсів, зокрема земельних, біологічних і водних, почав набувати все більшого значення у системі управління, прийняття рішень та прогностичних оцінок в аграрному секторі економіки. Дистанційне зондування у поєднанні із моделюванням може вчасно надавати інформацію про стан агроекосистем на великих територіях, у достатній просторовій деталізації і, що не менш важливо, за менших економічних витрат [1]. Досвід розвинутих країн, передусім США (наприклад програма FAS), країн ЄС (наприклад програма MARS), свідчить про високу ефективність використання супутникових даних у сфері управління та

оперативного інформаційного забезпечення сільського господарства й управлінських структур різного адміністративного рівня.

Загалом, дистанційне зондування Земної поверхні — це багатоцільова система, яка в часі і просторі забезпечує отримання та використання результатів наземних і космічних спостережень про стан агросфери та її окремих компонентів у комплексній інформаційній підтримці управління ресурсами.

Моніторинг агрокосистем за допомогою ДЗЗ дозволяє відстежувати зміни рослинного покриву, вологість ґрунтів, продуктивність угідь, а також виявляти ознаки деградації земель. Сучасні методи включають використання мультиспектральних, радарних і гіперспектральних знімків, обробку даних у геоінформаційних системах, а також застосування індексів рослинності та машинного навчання.

1.1. Супутникове дистанційне зондування.

Спостереження за Землею засобами дистанційного зондування з космосу є важливим інструментом для прийняття рішень та моніторингу в контексті боротьби з деградацією земель та опустелюванням. Дистанційне зондування охоплює широкий спектр методів для вимірювання значної кількості різноманітних екологічних параметрів і процесів на земній поверхні.[1]

Супутникове дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є однією з найефективніших сучасних технологій спостереження за станом земної поверхні, що базується на реєстрації та аналізі електромагнітного випромінювання, випроміненого або відбитого об'єктами земної поверхні. Цей метод дає змогу отримувати інформацію про великі території з високою регулярністю та просторовим охопленням, що особливо важливо для моніторингу агрокосистем.

Сутність супутникового ДЗЗ полягає у використанні спеціалізованих космічних апаратів, оснащених різними типами сенсорів (радарних, оптичних, гіперспектральних, інфрачервоних) які фіксують спектральні характеристики поверхні Землі. Завдяки цьому можлива непряма оцінка ряду показників, таких як

стан рослинності, температура поверхні, вологість ґрунту, динаміка землекористування та інші.

У поставлених задачах агроекологічного моніторингу супутникове ДЗЗ дозволяє:

- проводити багатосезонний аналіз стану сільськогосподарських угідь;
- оцінювати вплив стресових факторів (посуха, деградація ґрунтів, затоплення);
- виявляти просторово-часові зміни у продуктивності рослинності;
- здійснювати прогнозування врожайності на основі динаміки вегетаційних індексів (NDVI, EVI тощо).

Серед провідних супутникових місій, що забезпечують відкритий доступ до даних для екологічного та аграрного аналізу, можна відзначити програми Sentinel (ESA), Landsat (NASA/USGS), MODIS (NASA), PlanetScope, а також високоточні радари різних типів.

Нижче надано перелік та опис основних онлайн-платформ, завдяки яким аналіз поверхні Землі можна проводити в будь-який момент та в реальному часі, з винятковою точністю, достовірністю та в майже будь-якій точці Землі:

1. Google Earth Engine (GEE)

Головне призначення: обробка великих супутникових архівів та геопросторових даних у хмарному середовищі.

- Містить архіви знімків із супутників MODIS, Landsat, Sentinel, NOAA та ін.
- Забезпечує розрахунок вегетаційних індексів, аналіз змін, класифікацію земного покриву тощо.
- Можливість програмування мовою JavaScript або Python.
- Використовується як у наукових, так і в практичних цілях завдяки великій продуктивності й автоматизованим функціям.

Серед основних переваг можна виділити: безкоштовний доступ, глобальне покриття, потужні аналітичні можливості, інтеграція з іншими сервісами.

Приклад роботи з Google Earth Engine показано на рисунку 1.1.

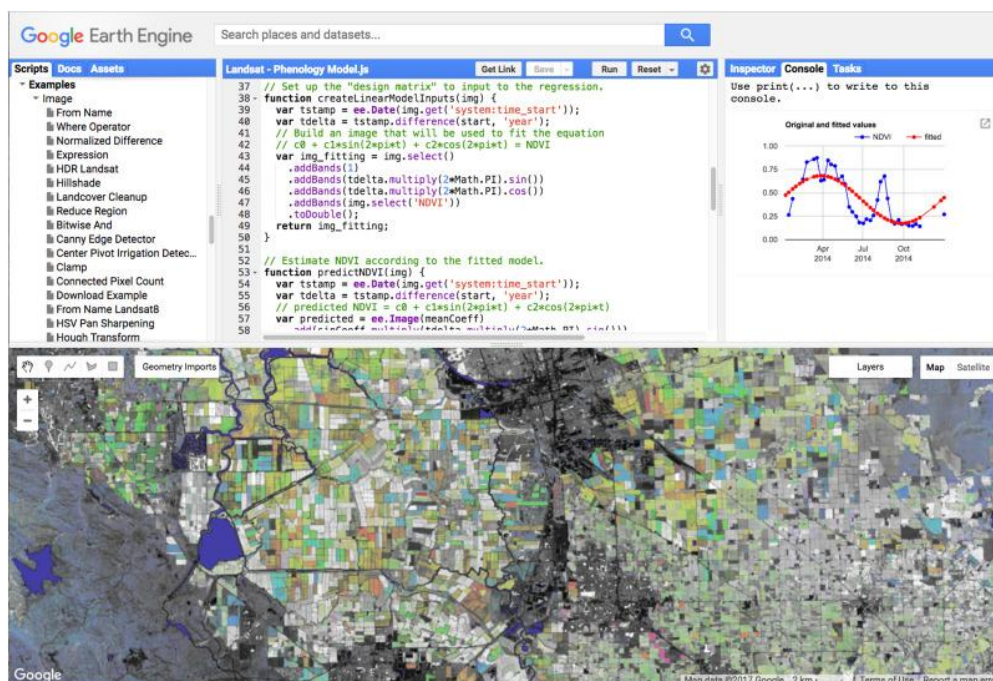


Рис.1.1.Скриншот з сайту Google Earth Engine

2. Sentinel Hub (EO Browser)

Призначений для швидкого перегляду, візуалізації та аналізу супутникових знімків з місії Sentinel, Landsat, MODIS.

- Можливість переглядати сцени в реальному часі або в ретроспективі (історія даних).
- Наявність готових індексів NDWI, NDVI, EVI, SCL та ін.
- Підтримка створення кастомних візуалізацій у Spectral Script Editor.

Основні переваги онлайн-платформи: зручний інтерфейс, висока швидкість роботи, інтерактивні шари, можливість завантаження даних.

Приклад роботи з онлайн-платформою Sentinel Hub продемонстровано на рисунку 1.2.

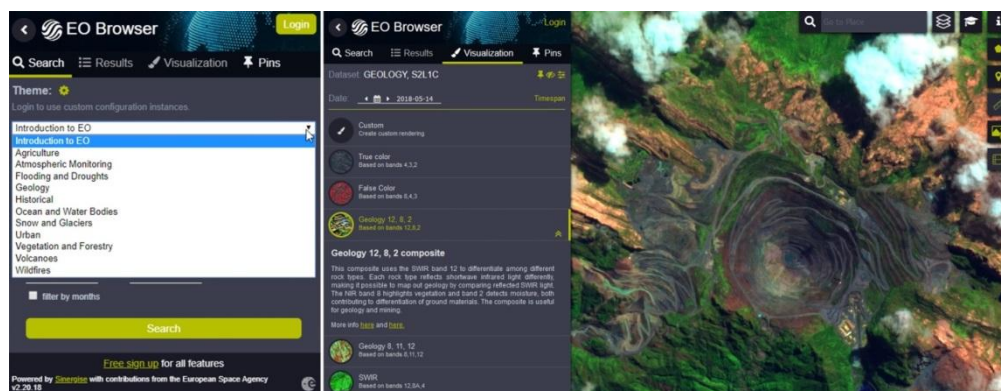


Рис.1.2.Скриншот роботи з сайтом Sentinel Hub

3. NASA Worldview

Головним призначенням є візуалізація супутникових даних із численних місій NASA майже в реальному часі.

- Охоплює глобальні дані з понад 900 супутникових шарів, включаючи хмари, пилові шторми, пожежі, температуру поверхні.
- Можливість швидкого аналізу кліматичних і екологічних явищ.

Переваги даної онлайн-платформи: простота використання, вільний доступ, корисно для відстеження кліматичних подій (посухи, пожежі, повені).

Приклад роботи з NASA Worldview показано на рисунку 1.3.

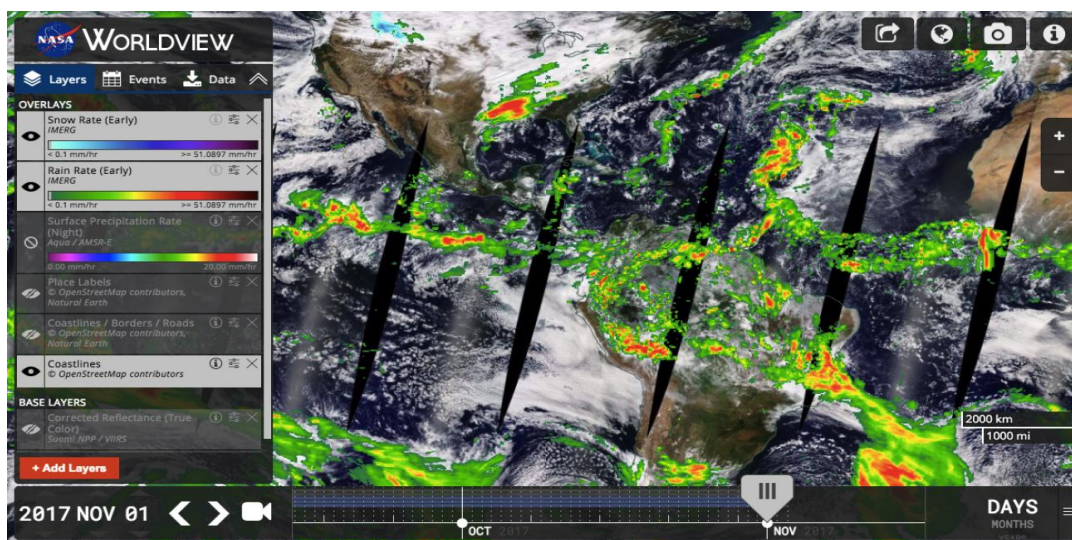


Рис.1.3.Скриншот роботи з сайтом NASA Worldview

4. Copernicus Open Access Hub / CREODIAS

Призначенням цих онлайн-сервісів офіційний є доступ до сирих та оброблених супутникових зображень Sentinel (1–5) Європейського космічного агентства (ESA).

- Можливість завантаження та попереднього перегляду продуктів L1, L2 (наприклад, Sentinel-2 MSI Level-2A).
- CREODIAS забезпечує хмарну обробку даних із додатковими сервісами для аналітики.

Переваги: надійне джерело офіційних даних, підтримка великих наукових проєктів, довгостроковий архів.

Приклад роботи з онлайн-сервісами Copernicus Open Access Hub / CREODIAS / продемонстровано на рисунку 1.4.



Рис.1.4.Скриншот роботи з сайтом Copernicus Open Access Hub

5. Crop Monitoring Platforms (наприклад EOS Crop Monitoring, OneSoil, Climate FieldView)

Основним призначенням даних платформ є забезпечення наукових потреб агровиробників і науковців, спрямованих на аналіз стану полів.

- Інтегрують супутникові індекси, зонування полів, метеодані, дозволяють спрогнозувати врожайність.
- Деякі з сервісів підтримують облік господарської діяльності та надають агрономічні рекомендації.

Переваги таких платформ: платформи адаптовані під потреби сільського господарства, часто мають мобільні додатки, візуально та інтерактивно зручні.

Принцип роботи однієї з моніторингових платформ (EOS Crop Monitoring) показано на рисунку 1.5.



Рис.1.5.Скриншот роботи з EOS Crop Monitoring

6. Sentinel-2 (ESA)

Це європейська супутникова місія, що є частиною програми Copernicus. Складається з двох супутників (Sentinel-2A і 2B), які забезпечують систематичне покриття всієї земної поверхні з високою частотою.

Особливості:

- Безкоштовний доступ до даних в будь-який час;
- Мультиспектральна камера (MSI) з 13 спектральними каналами, що надає високу точність знімків;
- Підходить для вегетаційного аналізу, оцінки ґрунтів, землекористування.

Візуальна робота супутника Sentinel-2 продемонстрована на рисунку 1.6.



Рис.1.6.Скриншот роботи з сайтом супутника Sentinel-2

7. Landsat 8 (NASA/USGS)

Американська місія в межах програми Landsat, яка має понад 40-річну історію архіву даних. Landsat 8 забезпечує високоякісні мультиспектральні зображення.

Особливості:

- 11 спектральних каналів високої точності;
- Безкоштовний доступ в будь-який момент;
- Висока геолокаційна точність;
- Ідеально підходить для довгострокового моніторингу кліматичних змін.

Робота з супутниковими знімками Landsat 8 продемонстрована на рисунку 1.7.

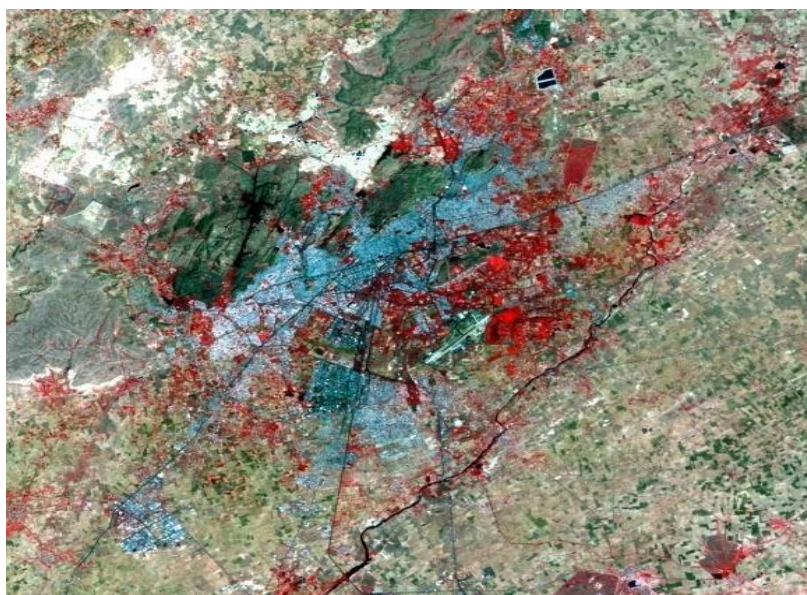


Рис.1.7.Скриншот роботи з сайтом супутника Landsat 8

8. PlanetScope (Planet Labs)

Це комерційне угруповання з кількох сотень мікросупутників («Doves»), що забезпечують щоденне глобальне знімання з високою просторовою роздільною здатністю.

Особливості:

- Надзвичайно висока частота оновлення;
- Висока просторова роздільність (~3 м/піксель);
- Платний доступ, але існують безкоштовні дослідницькі програми.

Приклад супутникового знімку PlanetScope можна оцінити на рисунку 1.8.



Рис.1.8. Скриншот роботи з сайтом PlanetScope.

9. RapidEye (Planet Labs)

Угруповання з 5 супутників (2008–2020), орієнтоване здебільшого на аграрний сектор і моніторинг довкілля. Архівні дані досі використовуються в наукових і практичних дослідженнях по всьому світу.

Особливості:

- 5 спектральних каналів, включно з «red-edge»;
- Просторова роздільність 5 м;
- Архів доступний для досліджень в будь-який момент.

Знімок з супутника RapidEye показано на рисунку 1.9.



Рис.1.9.Скриншот з сайту RapidEye

Онлайн-платформи супутникових знімків ДЗЗ забезпечують науковцям та дослідникам ефективний інструмент для аналізу великих масивів просторової інформації без необхідності витрат на дороге обладнання. Супутникові знімки

відіграють вирішальну роль у формуванні сучасної системи екологічного моніторингу, оцінки стану агроєкосистем, планування ресурсів та реагування на потенційні загрози довкіллю.

1.2. Аерозйомка з дронів (БПЛА)

В теперішньому та майбутньому, завдяки швидкому розвитку інформаційних технологій, дистанційне зондування Землі можна проводити не тільки завдяки супутникам, а й за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Безпілотні літальні апарати надають дані швидше, ніж пілотні літальні апарати. Застосування БПЛА, що літають на низькій висоті, дає можливість отримувати зображення з дуже високою роздільною здатністю та високою точністю.

БПЛА забезпечують оперативне, гнучке та детальне зондування сільськогосподарських ділянок з просторовою роздільністю від 2 см/піксель. Оснащення мульти- та гіперспектральними сенсорами, RGB, LiDAR та тепловізійними камерами дозволяє проводити надточну оцінку фізіологічного стану рослин, виявлення хвороб, стресів та картографування біомаси.

Розглянемо основні переваги аерозйомки з дронів у контексті дистанційного зондування Землі:

1. Дрони забезпечують зображення з роздільною здатністю до кількох сантиметрів на піксель, що є надзвичайно важливим для дрібномасштабного аналізу стану ґрунтів, рослин, технічних культур тощо.
2. Сучасні дрони можуть оснащуватися RGB-, гіперспектральними, мультиспектральними або тепловізійними камерами, що дозволяє проводити глибокий аналіз вегетаційного стану, температури поверхні, водного стресу тощо.
3. Запуск дрона можливий у будь-який потрібний момент, що дозволяє здійснювати моніторинг у критичні періоди вегетації або після екстремальних кліматичних та погодних подій.
4. Дані з дронів легко інтегруються в ГІС, що дозволяє поєднувати їх із супутниковими знімками для порівняння масштабів або калібрування індексів.

5. Для невеликих фермерських господарств або пілотних ділянок використання дрона може стати дешевою альтернативою комерційним супутниковим знімкам високої роздільності.

Для розуміння переваги використання дронів у агроєкологічному моніторингу зазначимо декілька наочних прикладів:

- Розрахунок NDVI, NDRE, SAVI та інших вегетаційних індексів на рівні окремих полів;
- Оцінка рівномірності посівів, швидкості росту рослин та біомаси;
- Виявлення зон стресу, шкідників, хвороб або недостатнього живлення;
- Моніторинг ґрунтової ерозії, забур'яненості та підтоплень;
- Контроль дотримання технологій обробітку та якості виконаних агротехнічних операцій.

Приклад використання БПЛА для зйомки посівів продемонстровано на рисунку 1.10.



Рис. 1.10. Приклад знімку з БПЛА. Джерело: cloudeo.group

Аерозйомка з дронів є незамінним елементом сучасної системи дистанційного зондування Землі, особливо на локальному рівні. Вона дає змогу отримати надточну та оперативну інформацію про стан агроєкосистем, яка може використовуватись як окремо, так і в комбінації із супутниковими даними для багаторівневого екологічного моніторингу. Особливо актуально це для України, де важливо точно визначати

масштаби деградації, пошкоджень від бойових дій, а також планувати відновлення аграрного потенціалу

1.3. Спектральні індекси

Один з основних та важливих методів інтерпретації даних дистанційного зондування Землі — це розрахунок вегетаційних та інших спектральних індексів.

Спектральні індекси — математичні вирази, які поєднують відбитість (reflectance) у двох або більше спектральних діапазонах для виділення ознак, що характеризують стан рослинності або інших об'єктів. Вони дозволяють кількісно оцінити стан посівів, рівень стресу, наявність бур'янів, а також прогнозувати врожайність

Основне призначення спектральних індексів:

- Визначення стану рослинності та рівня фотосинтетичної активності;
- Виявлення зон стресу, посухи, хвороб, шкідників;
- Моніторинг вегетації протягом сезону;
- Виявлення підтоплень або деградації земель;
- Оцінка вологості ґрунту та його ерозії;
- Картування пожеж, вирубки, деградації екосистем.

Найпоширеніші вегетаційні та спектральні індекси, що також використовуються як методи при дистанційному зондуванні Землі описано в таблиці №1.

Таблиця №1. Вегетаційні індекси.

Назва індексу	Формула	Призначення
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$	Використовується для оцінки щільності та здоров'я рослинності

EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2,5 \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 \times Red - 7,5 \times Blue + 1)}$	Індекс чутливіший до високої біомаси, знижує вплив атмосфери та ґрунтів
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$\frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$	Визначає вологість рослин, виявлення посухи або підтоплень
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$(1 + L) \times \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L}, L = 0,5$	Використовується для покращеної оцінки рослинності на ділянках з оголеним ґрунтом
GCI (Green Chlorophyll Index)	$\left(\frac{NIR}{Green}\right) - 1$	Оцінка концентрації хлорофілу
RENDVI (Red Edge NDVI)	$\frac{(NIR - RedEdge)}{(NIR + RedEdge)}$	Виявляє ранні зміни у стані рослин, чутливий до стресу
BAI (Burned Area Index)	$\frac{1}{(0,1 + R)^2 + (0,06 + NIR)^2}$	Використовується для оцінки вигорілих територій

Спектральні індекси — це науково обґрунтований і практично ефективний спосіб дистанційного аналізу стану агроecosистем. У поєднанні із аерознімками або супутниковими даними вони дають змогу своєчасно виявляти екологічні ризики, оцінювати ефективність агропрактик та формувати дані для прийняття рішень у сільському господарстві, особливо актуальними є в умовах екологічної нестабільності, що пов'язана з війною в Україні.

1.4. Тепловізійне та гіперспектральне зондування

Тепловізійне або інфрачервоне зондування є одним із напрямів дистанційного зондування Землі, яке базується на реєстрації теплового випромінювання об'єктів земної поверхні в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектра, зазвичай у межах 8–14 мкм довжини хвиль. Воно дає змогу визначати температуру поверхні незалежно від джерел видимого світла, і є цінним інструментом для екологічного, аграрного та гідрологічного моніторингу.

Усі об'єкти з температурою вище нуля випромінюють інфрачервону енергію. Інтенсивність цього випромінювання залежить від температури об'єкта, а також від його здатності випромінювати і поглинати тепло. Тепловізійні сенсори фіксують ці дані, дозволяючи побудувати теплову карту з просторовим розподілом температур. В контексті агроєкосистем тепловізійне зондування може допомогти з рядом таких задач як:

1. Виявлення водного стресу у рослин.

- Рослини, які відчують нестачу вологи, мають загальну вищу температуру листя, оскільки зменшується транспірація (випаровування через листя). Це дає змогу раннього виявлення посухи як окремого виду, так і цілого посіву.

2. Контроль зрошення.

- Тепловізійні знімки дозволяють визначити ефективність і рівномірність зрошення, виявити пересушені або перезволожені ділянки та вчасно виправити цю проблему.

3. Моніторинг ґрунтової вологи.

- Температура ґрунту напряму залежить від вмісту вологи, наприклад сухі ґрунти нагріваються швидше. Це дає змогу оцінити водний режим на поверхні полів та запобігти пошкодженню рослин через сильну засуху.

4. Виявлення хвороб і шкідників.

- Уражені рослини, як один з варіантів, можуть демонструвати аномальну температуру, що фіксується на тепловізійних знімках. Це дозволяє вчасно виправити ситуацію та зберегти врожай.

5. Аналіз стану пошкоджених рослин через бойові дії.

- У зонах активних бойових дій тепловізійне зондування можна використовувати для виявлення теплових аномалій, спричинених пожежами від вибухів, руйнуванням інфраструктури, витоками нафтопродуктів в атмосферу тощо.

На рисунку 1.11. показано приклад того, як виглядає тепловізійне зондування землі.

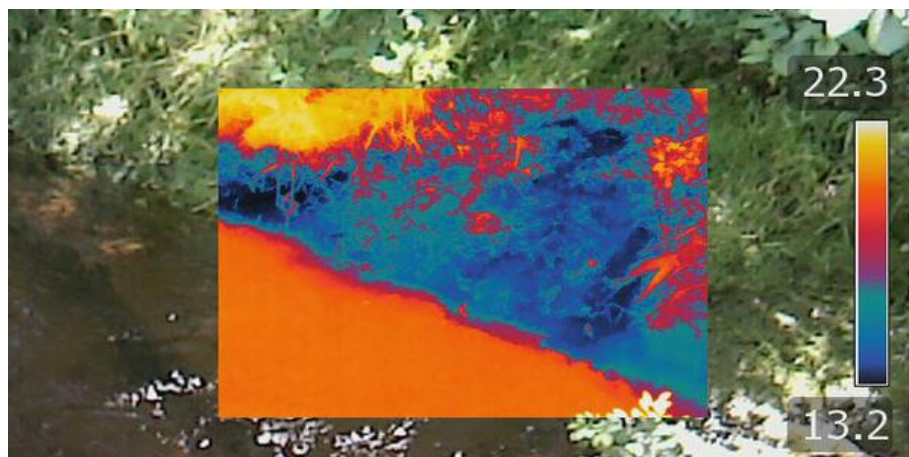


Рис 1.11. Приклад тепловізійного зондування ґрунту.

Джерелами для отримання онлайн-інформації про тепловізійне зондування Землі можуть слугувати: Landsat 8 TIRS, ECOSTRESS, Drones + FLIR камери, WorldView-3 (SWIR).

Основними перевагами тепловізійного зондування Землі можна назвати:

- Незалежність від сонячного освітлення (можливість і нічного моніторингу);
- Висока чутливість до зволоження та випаровування;
- Пряма оцінка фізіологічного стану рослин;
- Застосовність у кризових ситуаціях (наприклад пожежі, витоки, бойові дії).

Тепловізійне зондування є важливим засобом аналізу фізіологічного стану агроєкосистем, що доповнює мультиспектральні та оптичні методи ДЗЗ. Завдяки здатності фіксувати температуру поверхні, воно широко використовується для виявлення оцінки ефективності зрошення, водного стресу, а також у надзвичайних

ситуаціях. У контексті ситуації України, де зростає потреба в ефективному управлінні ресурсами в умовах війни та кліматичних змін, тепловізійне зондування є стратегічно важливим інструментом.

Гіперспектральне зондування (Hyperspectral Remote Sensing) — це високоточний метод дистанційного зондування, що полягає у вимірюванні електромагнітного випромінювання від об'єктів земної поверхні у великій кількості суміжних та вузьких спектральних каналів (зазвичай від 100 до понад 400 каналів) у діапазоні від інфрачервоного до ультрафіолетового випромінювання. Цей метод дозволяє отримувати "спектральний відбиток" кожного пікселя, що робить можливим точну ідентифікацію матеріального складу поверхні або стану рослинності.

Гіперспектральне зондування Землі може допомогти у вирішенні таких поставлених задач як:

1. Оцінка здоров'я і складу рослинності. Гіперспектральні дані дозволяють виявити тонкі зміни у фотосинтетичній активності, вмісті води, азоту, хлорофілі, пігментів тощо.
2. Моніторинг стресу рослин. Виявлення стресу на ранніх етапах, наприклад спричиненого посухою, забрудненням, шкідниками чи дефіцитом елементів живлення.
3. Картування ґрунтів. Визначення типу ґрунту, органічної речовини, вологості та вмісту мінералів.
4. Контроль якості врожаю. Гіперспектральні сенсори дозволяють оцінити зрілість, якісні характеристики та вологість сільгосппродукції ще до її збору.
5. Деградація екосистем, в тому числі через бойові дії. Дає змогу фіксувати пошкодження ґрунтів, руйнування або забруднення біорізноманіття з високою точністю.

Приклад принципу роботи гіперспектрального зондування наведено на рисунку 1.12.



Рис.1.12.Приклад гіперспектрального зондування Землі.

Джерелами інформації щодо гіперспектрального зондування Землі, а саме отримання свіжих та точних знімки, можуть слугувати: EnMAP, PRISMA, HyMap, AVIRIS (NASA), а також дрони з гіперспектральними камерами.

Основними перевагами та плюсами гіперспектрального дистанційного зондування є:

- Надзвичайно точне спектральне розпізнавання;
- Розширене застосування в агрономії, екології, геології, моніторингу забруднень;
- Можливість створення унікальних «спектральних підписів» об'єктів;
- Глибока оцінка стану екосистем і рослинності.

Тепловізійне та гіперспектральне зондування є двома взаємодоповнюючими методами дистанційного зондування Землі, які надають вчасну та поглиблену інформацію про стан агроекосистем. Тепловізійне зондування дозволяє оцінювати температурні характеристики поверхні, контролювати ефективність зрошення, виявляти водний стрес, а також фіксувати теплові аномалії, пов'язані з впливом бойових дій або деградацією земель. Гіперспектральне зондування ж, забезпечує високу спектральну роздільність і дозволяє ідентифікувати фізіологічні, структурні та хімічні зміни у рослинності та ґрунтах ще до появи візуальних ознак проблем.

У комплексі ці два методи дозволяють отримувати як спектральні, так і термальні характеристики об'єктів, що значно підвищує точність і якість екологічного аналізу. Їх поєднання відкриває нові можливості для прогнозування врожайності, моніторингу змін під впливом клімату або антропогенних чинників, оптимізації агротехнічних заходів, а також для оцінки наслідків військових дій на сільське господарство.

1.5. ГІС-технології та штучний інтелект

Геоінформаційна система – це така система, що забезпечує можливість використання, редагування, збереження, аналізу та відображення просторових (географічних) даних та пов'язаної з ними інформації про об'єкти. ГІС передбачає можливість управління базами даних (СУБД), редакторами векторної та растрової графіки, а також результатами моделювання.

Дані, що зберігаються в ГІС, мають географічну прив'язку, тобто пов'язані з певним розташуванням відносно Землі, що визначається у вигляді географічних координат. Будь-яку інформацію, що має просторову прив'язку, можна інтегрувати в ГІС у вигляді шарів інформації. Кожен шар має містити інформацію про один тип або про певне одне явище об'єктів земної поверхні.

Об'єкти можна розділити на дві абстрактні категорії:

- дискретні дані - окремі об'єкти, які у певному місці земної поверхні або можуть бути, або ні (колодязь, будинок, дорога);
- безперервні дані – дані, які характеризують територію загалом (рельєф, тип ґрунту, середньорічна температура).

Для представлення просторових об'єктів використовують три основні моделі просторових даних:

- векторна модель (дані у вигляді координатних пар, що можуть бути у формі ліній, точок або полігонів);
- растрова модель (дані у вигляді матриці величин (прямокутної сітки));
- триангуляційна модель (дані у вигляді сітки нерівномірних трикутників)

Здачі дистанційного зондування Землі, в контексті агроєкосистеми, з вирішенням яких може допомогти ГІС-система:

1. Обробка даних.

- ГІС-середовище дозволяє корегувати, фільтрувати, мозаїкувати та нормалізувати супутникові або аерофотознімки.

2. Геоприв'язка і картографування.

- ГІС забезпечує точну географічну локалізацію об'єктів і дозволяє створювати карти показників (наприклад, NDVI, вологозабезпеченості, температури поверхні).

3. Просторовий аналіз.

- На основі даних ДЗЗ можна виконувати зонування, аналіз просторових змін, класифікацію земель, зміни рослинності, оцінку деградації ґрунтів тощо.

4. Мультичасовий аналіз.

- Завдяки ГІС можна проводити аналіз змін у динаміці — порівнювати знімки за різні роки, виявляти тренди, наслідки впливу клімату або бойових дій, сезонні зміни.

5. Інтеграція з іншими джерелами даних.

- До супутникових зображень можна додавати ґрунтові карти, погодні умови, статистику врожайності, результати польових обстежень.

Онлайн платформи для роботи з даними ГІС-системи: QGIS, ArcGIS, Google Earth Engine (GEE), Sentinel Hub EO Browser, AgroMonitoring / EOSDA / Crop Monitoring

Застосування інструменту інтерполяції QGIS для визначення розподілу гумусу в межах поля за даними відбору проб показано на рисунку 1.13.

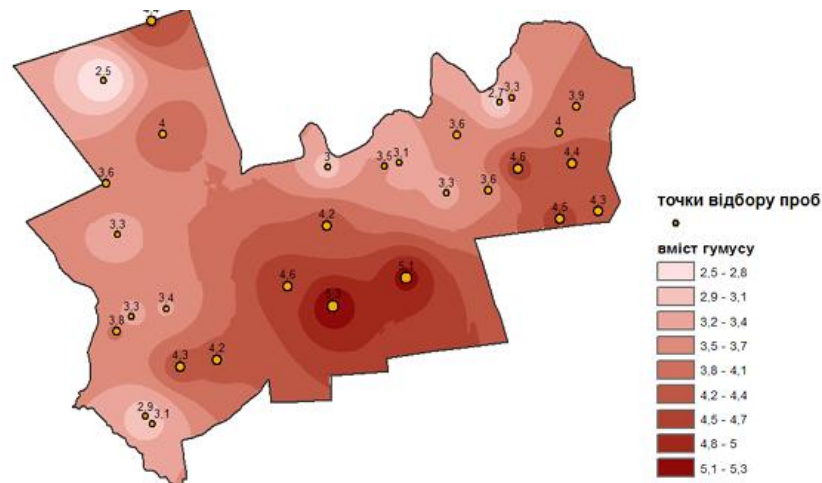


Рис.1.13.Застосування QGIS для відбору проб гумусу.

Штучний інтелект (ШІ) значно розширює можливості дистанційного зондування Землі, забезпечуючи автоматизацію аналізу великих обсягів супутникових та аерознімків, іншої геопросторової інформації, зменшуючи суб'єктивність інтерпретації та підвищуючи точність прийняття рішень у сфері агроекологічного моніторингу, геології, екології, містобудування тощо. Серед основних напрямків застосування ШІ в дистанційному зондуванні Землі можуть бути:

1. Автоматизована класифікація земного покриву.

- Використання алгоритмів машинного навчання (наприклад SVM, Random Forest, нейронних мереж) для розпізнавання типів рослинності, води, ґрунтів, урбанізованих територій.
- Глибокі нейронні мережі (CNN) дозволяють швидко і точно класифікувати знімки навіть із високою просторовою складністю.

2. Виявлення змін у динаміці.

- Штучний інтелект дозволяє автоматично знаходити зміни у ландшафті, наприклад: деградацію сільгоспугідь, появу нових об'єктів, вирубку лісів, руйнування через бойові дії.
- Ефективно працюють алгоритми time-series analysis та рекурентні нейронні мережі (LSTM, RNN).

3. Прогнозування врожайності та аналіз агрономічних показників.

- На основі історичних супутникових даних, ґрунтової інформації та погодних умов моделі штучного інтелекту можуть прогнозувати майбутню врожайність, рівень урожайних втрат, фази розвитку культур.

4. Оцінка загального стану рослинності.

- Глибоке навчання використовується для аналізу спектральних індексів (NDVI, NDWI, EVI тощо) у комплексі з іншими параметрами для виявлення хвороб, дефіциту вологи та стресів.

5. Обробка гіперспектральних даних.

- Штучний інтелект дозволяє обробляти гіперспектральні знімки, що складаються з сотень каналів, визначаючи точні "спектральні підписи" матеріалів, забруднень, стану культур тощо.

6. Розпізнавання об'єктів на зображеннях.

- Використання комп'ютерного зору (Computer Vision) для виявлення доріг, техніки, будівель, пожеж, військової інфраструктури, кратерів тощо на знімках високої роздільності.

Штучний інтелект є одним з прогресивних інструментів у сучасному дистанційному зондуванні Землі. Його інтеграція у сферу агромоніторингу дозволяє переходити від простого спостереження до точного передбачення, створюючи підґрунтя для розумного, ефективного та стійкого управління агроecosystemами, особливо в умовах кліматичних викликів і післявоєнного відновлення.

Онлайн інструментами штучного інтелекту можуть слугувати такі платформи як: Google Earth Engine + ML, ESA AI4EO, Sentinel Hub + EO-Learn, DeepLab, U-Net, OpenCV, TensorFlow, PyTorch.

Приклад знімку з супутника на платформі ESA AI4EO показано на рисунку 1.14.



Рис.1.14. Супутниковий знімок на платформі ESA AI4EO.

Штучний інтелект та ГІС-технології є важливими інструментами, що відчутно підвищують ефективність і точність дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Вони виконують взаємодоповнюючі функції в системі просторового аналізу: ШІ автоматизує процеси аналізу, виявлення закономірностей і прогнозування, а ГІС, в свою чергу, забезпечує структуровану платформу для інтеграції, візуалізації та обробки геоданих. Системи ГІС та ШІ формують нову парадигму просторового мислення і прийняття рішень, роблячи дистанційне зондування Землі ще більш дієвим інструментом у сфері природокористування, просторового планування та агроєкології.

РОЗДІЛ 2. КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ СТАНУ АГРОЕКОСИСТЕМ, ЯКІ МОЖУТЬ БУТИ ОЦІНЕНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЗЗ.

Ключові показники стану агроecosистем, що можуть бути оцінені за допомогою дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), дають змогу комплексно аналізувати продуктивність, рівень впливу зовнішніх факторів на сільськогосподарські угіддя та екологічну стійкість. Завдяки супутниковим і аерознімкам можна відстежувати просторову та часову динаміку аграрних ландшафтів, не вдаючись до затратних і інколи неможливих польових спостережень.

Одним із основних параметрів є стан рослинного покриву, що відображає загальний розвиток культур, щільність, їхню вегетаційну активність і здоров'я. З допомогою спектральних індексів, наприклад NDVI, фіксуються зміни у зеленій біомасі, які можуть свідчити про стреси, початкові ознаки ураження хворобами чи дефіцит вологи. Через регулярне спостереження можна виявити як поступове погіршення стану культур, так і раптові негативні події — наприклад, наслідки посух, підтоплень, граду або бойових дій.

Загалом, дистанційне зондування дає змогу оцінювати не лише статичний стан агроecosистем, а й їхню динаміку, чутливість до змін клімату чи людської діяльності, здатність до відновлення після стресів. Ці показники формують основу для сталого управління сільським господарством, збереження продуктивності аграрних ландшафтів у довгостроковій перспективі та планування заходів адаптації до змін середовища.

2.1. Вегетаційні індекси NDVI, EVI, SAVI.

Вегетаційні індекси — це такі числові показники, які розраховуються на основі спектральних характеристик, отриманих із супутникових або аерознімків, і слугують для оцінки стану рослинного покриву. Вони відображають густоту рослинності, рівень фотосинтетичної активності, стан здоров'я, стресові стани або стадії вегетації, біомасу. Ці індекси базуються, переважно, на відмінностях у відбитті світла в червоному (Red) і ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах, адже хлорофіл поглинає червоне світло, а листя відбиває інфрачервоне.

Загалом, використання в роботі чи дослідженнях, вегетаційних індексів дозволяє:

- a) моніторити зміни рослинності у часі та просторі;
- b) проводити зонування полів за рівнем продуктивності;
- c) оцінювати вплив погодних умов або стресових факторів;
- d) прогнозувати врожайність культур.

Найпопулярнішими та найефективнішими вважаються вегетативні індекси NDVI, EVI та SAVI.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормалізований відносний індекс рослинності, який дозволяє робити висновки про розвиток біомаси рослин під час вегетації. Є різні методи визначення цього показника, і кожен має свої переваги та недоліки.

Формула(2.1.) для розрахунку:

$$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (2.1.)$$

Згідно з формулою, описаною вище, щільність рослинності (NDVI) дорівнює різниці інтенсивностей відбитого світла у інфрачервоному і видимому діапазоні, діленою на суму їх інтенсивностей. Розрахунок базується на двох найбільш стабільних (тобто таких, що не залежать від інших чинників) ділянках спектральної кривої відображення судинних рослин. У видимій області спектру (0,4-0,7 мкм) максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, а в інфрачервоній області(0,7-1,0 мкм) область максимального відображення клітинних структур листа. Тобто висока фотосинтетична активність веде до меншого відображення у видимій області спектру і більшому в інфрачервоній.

Перевагами використання NDVI при розрахунках є:

- Датчик активного джерела світла працює однаково добре за будь-яких умов освітлення і видає значення NDVI без погрешностей;
- В момент обстеження на екрані без зупинок показується поточне значення NDVI;

- Повна незалежність від погодних умов (наприклад хмарність, холодна погода чи вітер) не впливають на результат, єдине обмеження — неточність результатів NDVI при великій вологості рослин (під час або після дощу);
- Методом NDVI можна обчислити велику кількість територій одночасно (рисунок 2.1.).

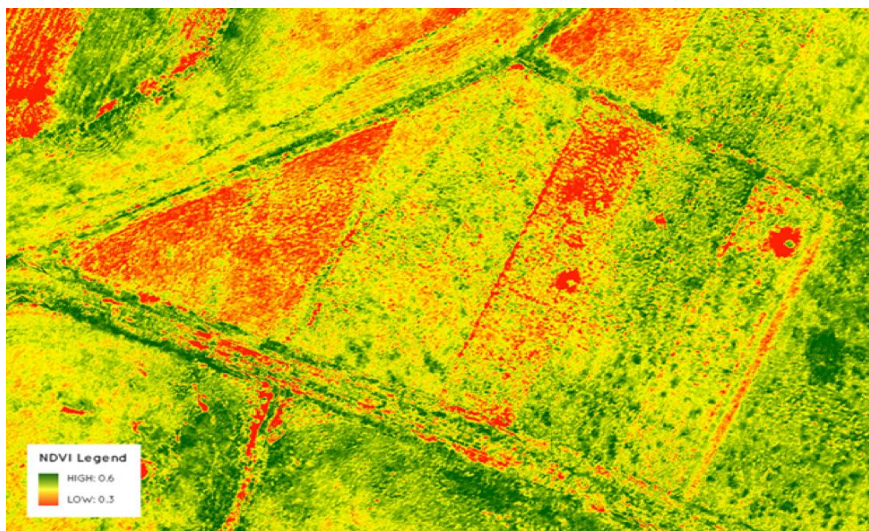


Рис.2.1. Зеленим кольором позначено здорову рослинність, червоним кольором або відсутність рослин, або інші складові (голий ґрунт, вода)[6]

EVI (Enhanced Vegetation Index) — трохи вдосконалений вегетаційний індекс. Розроблений як поліпшення індексу NDVI, через оптимізацію сигналу про рослинність в областях з високим індексом листкової поверхні (LAI). Індекс використовує синю область відображення для точності фонових сигналів ґрунту і зменшенню атмосферного впливу, у тому числі аерозольного розсіювання.

Такий індекс найбільш корисний та дієвий в регіонах з високим рівнем LAI, де метод оцінки NDVI може перенасичуватись. Він краще враховує атмосферні ефекти та вплив фону ґрунту, що робить його особливо цінним у густих лісових масивах або при високій вологості.

EVI вираховують за такою формулою (2.2.):

$$2,5 \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 \times Red - 7,5 \times Blue + 1)} \quad (2.2.)$$

Перевагами використання індексу EVI є:

- Є менш чутливим до атмосферного шуму, аніж NDVI;
- Краще працює в умовах щільної рослинності (густі ліси, велика кількість зелених рослин);
- Враховує синій канал для покращення точності (рисунок 2.2)

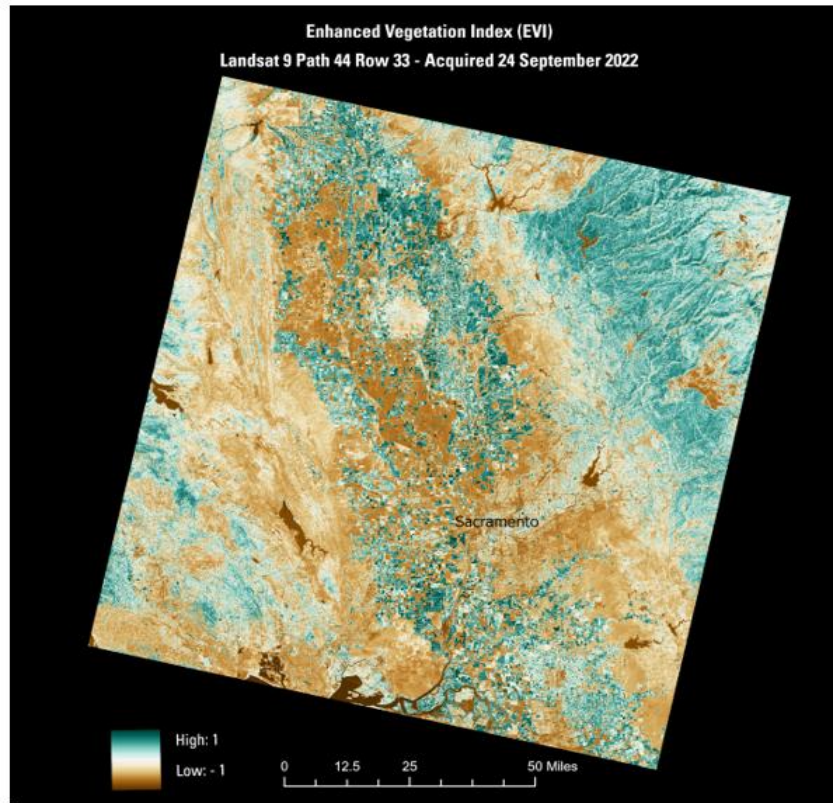


Рис.2.2. Знімок з супутника Landsat 9 в Сакраменто. Синій (блакитний) вказує на густу рослинність, помаранчевий вказує на відсутність рослинності або інші складові (вода, ґрунт)

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) — індекс рослинності з поправкою на велику площу голого ґрунту. SAVI був створений для візуальної мінімізації впливу яскравості ґрунту на результати досліджень. Використовується для моніторингу посушливої місцевості з маленькою вегетацією (менше 15% загальної площі), аналізу культур на ранніх стадіях розвитку та для відкритих просторів, де поверхня ґрунту не захищена рослинністю.[9]

Формула (2.3.) для розрахунку SAVI:

$$(1 + L) \times \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L}, L = 0,5 \quad (2.3.)$$

Головні переваги вегетаційного індексу SAVI:

- Краще працює в умовах малої вегетаційної щільності, де відсоток рослинності менше 15%;
- Більш точно показує кількість та стан рослинності на засушливих або відкритих ділянках (рисунок 2.3.)

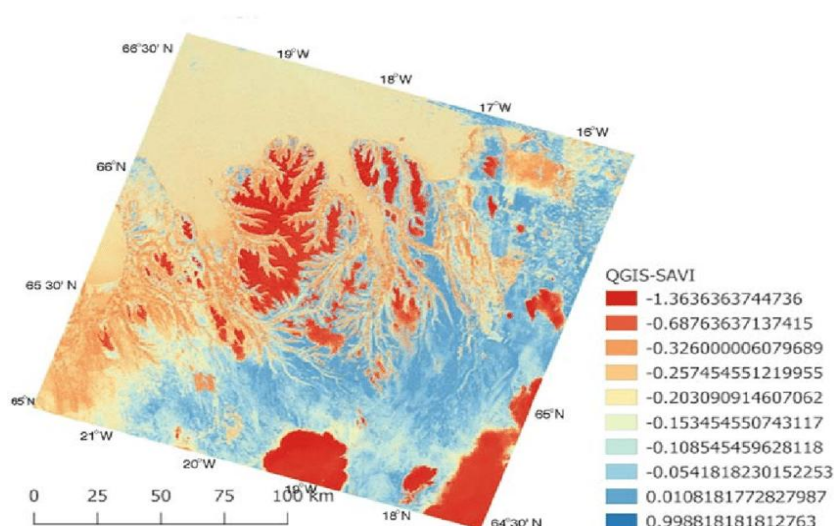


Рис.2.3. Темно-синім та синім кольором позначено рослинність, світло-блакитним кольором позначено проріджену рослинність, червоним та помаранчевим оголені ділянки ґрунту або інші компоненти (вода, сніг/лід, скелі)

NDVI, EVI та SAVI — потужні інструменти при роботі з дистанційним моніторингом рослинного покриву, кожен з яких має свою специфіку і область застосування. У сукупності вони дозволяють точно оцінювати стан агроєкосистем у найрізноманітніших умовах. Їх використання – фундаментальний елемент сучасного аналізу сільськогосподарських територій у рамках ДЗЗ.

2.2. Біомаса та продуктивність рослин.

Біомаса — це кількість речовини живих організмів на одиницю площі або об'єму, виражена в одиницях енергії або маси ($\text{г}/\text{м}^2$, $\text{Дж}/\text{м}^2$). Біомаса зелених рослин (тобто фітомаса) та її річний приріст (або первинна продукція) в десятки разів перевищує біомасу мікроорганізмів і тварин. Проте активна життєдіяльність

мікроорганізмів, їх хімічний склад та високий вміст білків визначають їхню роль у гумусоутворенні та нагромадженні у ґрунті азотних сполук.

Біомаса рослин є одним із важливих, ключових показників стану агроєкосистем, який широко вимірюється за допомогою методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Вони відображають сумарну масу рослинного матеріалу на одиницю площі — як надземну (стебла, листя, колосся), так і підземну. Біомаса прямо пов'язана з продуктивністю агроєкосистеми, здатністю до накопичення органічної речовини та станом здоров'я культур.

Оцінка біомаси на основі супутникових або дронівих знімків, про які згадувалось в Розділі 1, ґрунтується на спектральних характеристиках покриву рослинності — передусім у ближньому інфрачервоному та червоному діапазонах. Основними інструментами є вегетаційні індекси, про які вже було згадано раніше, які корелюють із фактичним накопиченням фітомаси. Наприклад:

- NDVI точно відображає загальну зелену біомасу;
- EVI більш точно працює на ділянках із щільною рослинністю;
- LAI (Leaf Area Index) оцінює загальну площу листя, що теж опосередковано вказує на біомасу.

Сучасні підходи до визначення біомаси також застосовують машинне навчання та регресійні моделі, які зв'язують дані ДЗЗ з польовими вимірами біомаси для підвищення точності. Моделі можуть враховувати тип культури, погодні умови, фазу вегетації та тип ґрунту.

Чому важливо своєчасно оцінювати біомасу рослин?

1. Біомаса є прямим індикатором розвитку та росту рослин, а отже — майбутнього, потенційного врожаю.
2. Більша біомаса зазвичай означає вищу здатність культури до фотосинтезу, а отже — кращу адаптацію до умов навколишнього середовища.
3. Зменшення біомаси може вказувати на вплив посухи, шкідників, хвороб або інших факторів стресу.

4. Зміни біомаси дозволяють оцінити ефективність добрив, сівозмін, зрошення тощо.

Переваги методів дистанційного зондування Землі для оцінки загальної біомаси:

- Велике просторове охоплення, завдяки якому контроль за біомасою на рівні полів, регіонів або всієї країни не є чимось нереальним;
- Можливість побудови динамічних карт змін біомаси протягом сезону, в будь-який момент;
- Завдяки супутниковим знімкам зникає потреба в постійному виїзді на поля чи ділянки, що значно спрощує процедуру оцінки та прогнозування врожайності.

Слід зазначити, що в контексті війни в Україні, коли доступ до деяких полів обмежений, дистанційне зондування залишається одним із небагатьох способів надійно та якісно оцінювати стан біомаси культур. Це критично важливо для планування харчової безпеки, аграрної політики та міжнародного звітування щодо продовольчого потенціалу країни.

Продуктивність рослин є одним з головних інтегральних показників стану агроєкосистем, що відображає здатність рослин до утворення біомаси й урожаю в конкретних умовах навколишнього середовища. У контексті ДЗЗ продуктивність розглядається як кількісна характеристика результату росту культур на основі їх спектральних, структурних або теплових ознак, зафіксованих супутниками чи дронами:

- Темпи приросту зеленої біомаси;
- Ефективність використання ресурсів (води, сонячної радіації, поживних речовин);
- Очікувану урожайність на основі історичних даних і поточного вегетаційного стану;
- Фотосинтетичну активність рослин (оцінювану через вегетаційні індекси, особливо NDVI, EVI).

Перелік методів ДЗЗ, за якими можна визначити продуктивність рослин:

1. Динамічний моніторинг. Такий моніторинг дозволяє аналізувати зміни продуктивності протягом сезону, ідентифікувати затримки розвитку рослин, піки росту чи зони пригнічення;
2. Вегетаційні індекси (NDVI, SAVI, LAI, GNDVI) дають уявлення про щільність, здоров'я та активність рослинного покриву, що прямо корелюється з продуктивністю;
3. Оцінка аномалій через супутникові знімки, які дозволяють виявити відхилення від середніх багаторічних значень продуктивності, що може свідчити про стрес або потенційну втрату врожаю;
4. Моделі продуктивності (наприклад, моделі на основі Monteith's light-use efficiency), що комбінують спектральні дані з метеорологічними (радіація, опади, температура) для розрахунку первинної продуктивності.

Продуктивність рослин та біомаса є взаємопов'язаними, основними показниками стану агроecosystem, які забезпечують комплексне уявлення пророзвиток, ріст і потенційний урожай сільськогосподарських культур. Обидва параметри відображають біологічну відповідь рослин на загальні умови середовища, агротехнічні заходи та стресові впливи (природні чи антропогенні).

Використання даних ДЗЗ дозволяє точно та ефективно оцінювати ці показники на великих площах, з високою просторовою і часовою роздільністю, без необхідності постійного «реального» моніторингу. ГІС, ШІ, математичні моделі, супутникові та дроніві платформи у поєднанні з вегетаційними індексами (NDVI, EVI, SAVI) дають змогу отримати оперативну й об'єктивну інформацію про стан культур упродовж усього вегетаційного періоду.

З цього слідує, що біомаса та продуктивність — це не лише біофізичні параметри, а стратегічні індикатори, які за допомогою методів дистанційного зондування Землі можуть бути точно і своєчасно виміряні задля прийняття обґрунтованих рішень в агросекторі.

2.3. Вологість ґрунту.

Вологість ґрунту — вкрай важливий параметр у сільському господарстві, який безпосередньо впливає на ріст, розвиток і продуктивність рослин. Моніторинг методами ДЗЗ дозволяє оцінити водний баланс, ідентифікувати зони посухи або перезволоження, оцінити ефективність зрошення, а також прогнозувати врожайність. Значення нормальних показників вологості ґрунту для агроecosистем:

- a) Ґрунтова волога — це ключове джерело для транспірації та фотосинтезу. Її дефіцит призводить до стресу, зниження урожайності та біомаси рослин.
- b) Інформація про вологість дозволяє точніше планувати зрошення, обробіток ґрунту та краще підбирати добрива.
- c) Своєчасне виявлення сухих або пересушених ділянок, які потребують адаптивного управління або спеціальних культур, може врятувати не тільки один окремий врожай, а й забезпечити майбутній.

Як можливо оцінити вологість ґрунту за допомогою різних методів ДЗЗ?

1. Радарні (мікрохвильові) методи.

- Активні сенсори (наприклад Sentinel-1) фіксують розсіяний сигнал від поверхні ґрунту. Ґрунтова волога змінює діелектричні властивості, що впливають на зміну сигналу. Це один з найефективніших методів, оскільки радар проникає крізь хмари й може працювати у будь-яку погоду (рисунок 2.4.)

2. Пасивні мікрохвильові сенсори.

- Наприклад, супутникові знімки SMAP від NASA. Такий супутник спеціально призначений для глобального моніторингу вологості ґрунту, що надає високоточні дані про поверхневу вологість (до ~5 см глибини). Приклад наведено на Рисунку 2.5.

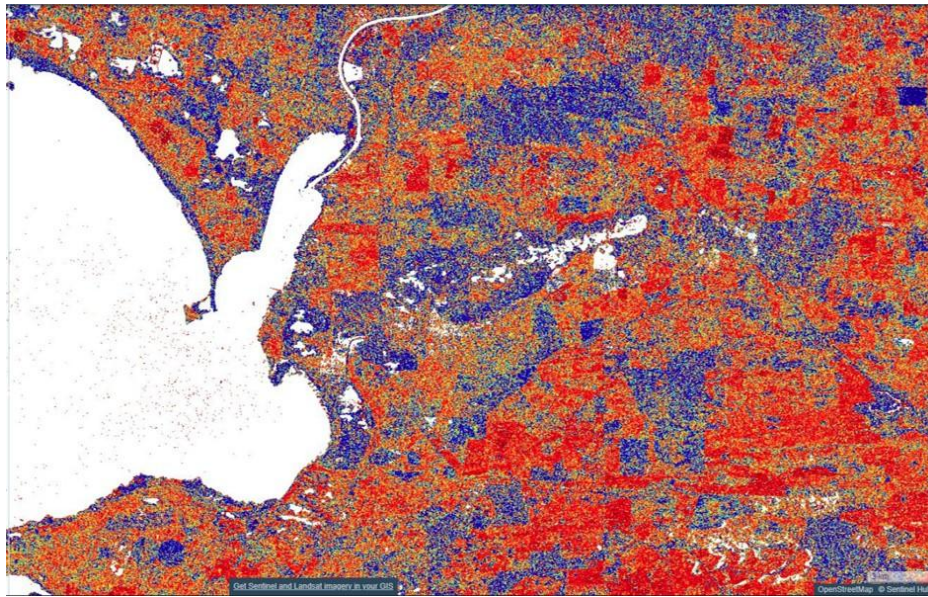


Рис.2.4. Знімок розподілу вологості ґрунту з супутника Sentinel-1, де синій колір вказує на високий рівень вологості, червоний – на низький, білий – забудовані території або постійні води (озера)

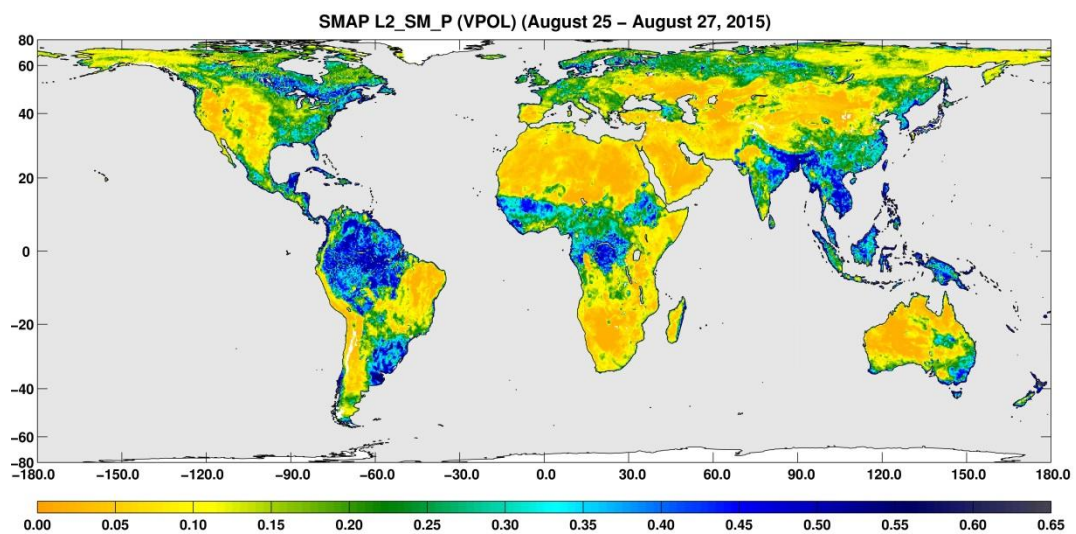


Рис.2.5. Глобальна карта поверхневої вологості ґрунту SMAP. Де, темно-синій – дуже висока вологість, помаранчевий та червоний – дуже низька вологість, що характерна для пустель.

3. Оптичні та інфрачервоні дані.

- Такі дані опосередковано оцінюють вологість ґрунту через загальний стан рослин (вегетатійні індекси, термальні знімки). Наприклад, такі індекси як NDWI (Normalized Difference Water Index), LST (Land Surface Temperature) дозволяють робити висновки про наявність або дефіцит вологи, рисунок 2.6.

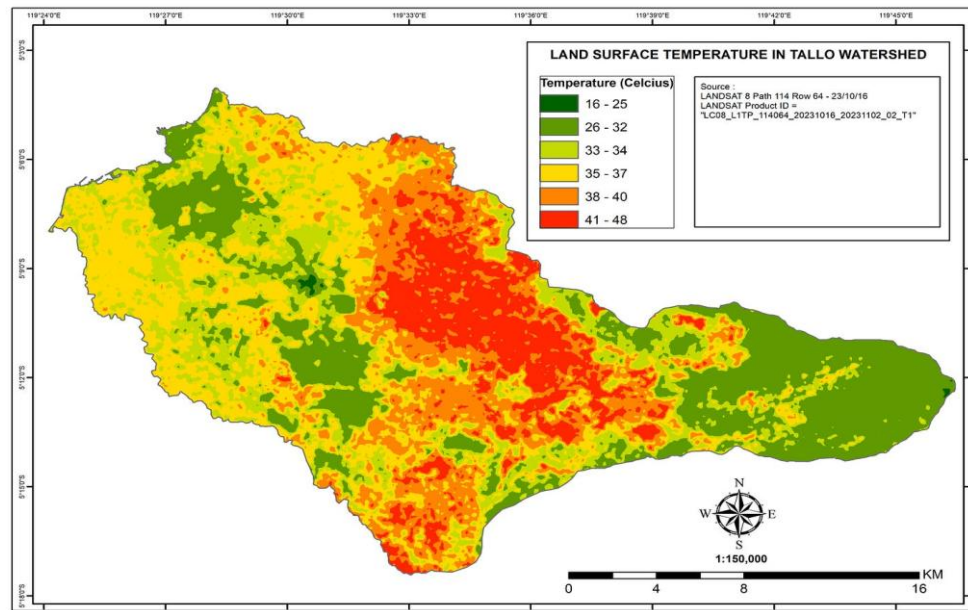


Рис.2.6. Знімок карти температури поверхні землі з супутника Landsat 8, де: темно-зелений – найнижчі температури поверхні Землі (16°-25°), а червоні – найвищі (41°-48°).

Загальний моніторинг вологості ґрунту за допомогою ДЗЗ — науково обґрунтований, ефективний і неінвазивний спосіб забезпечення сталого управління агроекосистемами. Він дає змогу науковцям, аграріям, екологам і державним структурам приймати обґрунтовані рішення щодо адаптації до змін клімату, оптимізації зрошення та збереження родючості земель.

2.4. Рослинний покрив.

Рослинний покрив — один і найінформативніших показників стану агроекосистем, що безпосередньо відображає продуктивність, життєздатність і здоров'я культур. При дистанційному зондуванні Землі рослинний покрив є візуалізованим індикатором, який легко вимірюється та аналізується на великих площах[5]. Стан і структура рослинного покриву свідчать про: щільність і рівномірність посівів, фази вегетації, аномалії росту, стресові зміни, ураженнями шкідниками чи хворобами, також це говорить про наслідки посухи.

На методах досліджень, про які ми говорили вище, розглянемо як за допомогою дистанційного зондування Землі можна оцінити рослинний покрив.

- **Вегетаційні індекси.**

Серед усіх вегетаційних індексів найчастіше використовують NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який дозволяє кількісно оцінити наявність зеленої маси (рисунок 2.7.)

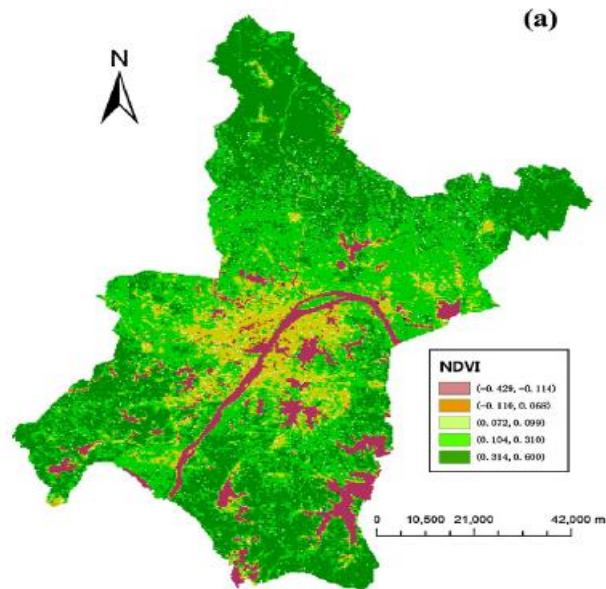


Рис.2.7. Карта, що характеризує рослинний покрив території. Де коричневий – дуже низьке значення покриву території, або повна відсутність рослинності, а темно-зелене – дуже густе і здорове.

- Класифікація покриву

За допомогою машинного навчання або алгоритмів обробки зображень (наприклад Google Earth Engine) можливо автоматично розрізнити типи покриву: рілля, ліс, багаторічні культури, стерня тощо. Або проаналізувати, як змінився покрив за десятки років (рисунок 2.8.).

Change Detection of Vegetation Cover by NDVI Technique using Google Earth Engine

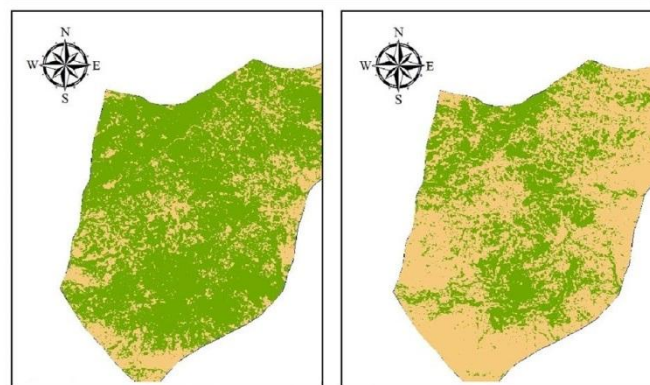


Figure 2: NDVI classes of study area in: (a) 1990 and (b) 2015.

Рис.2.8. Показує дві карти 1990р. та 2015р., де зелений колір – це густа рослинність, а помаранчевий – її часткова або повна відсутність.

- Текстурний та структурний аналіз.

За даними з високою роздільною здатністю (наприклад з дронів або супутників PlanetScore, WorldView) можливо точно оцінити просторову неоднорідність, зрідженість посівів, наявність бур'янів або пошкоджень (прикладом є Рисунок 2.9.).

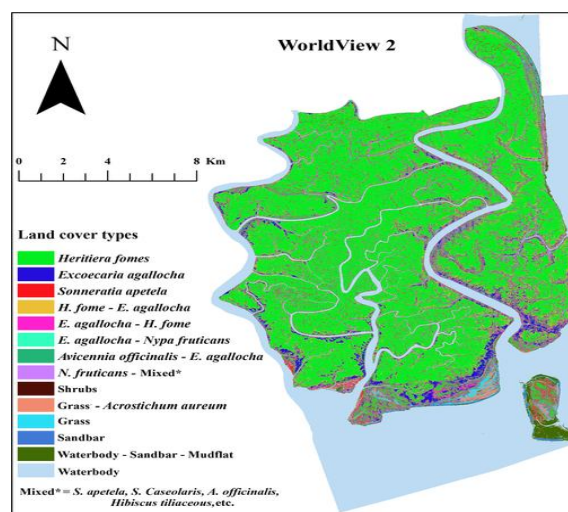


Рис.2.9. Показує класифікаціє рослинного покриття, а саме мангрових дерев різних підвидів.

- Динамічний моніторинг.

Майже будь-який рослинний покрив змінюється впродовж усього сезону, тому регулярні знімки дозволяють відстежувати вегетаційний цикл, прогнозувати розвиток культур і виявляти проблемні ділянки.

Рослинний покрив — ключовий біофізичний індикатор стану агроєкосистем, який найкраще виявляється через засоби дистанційного зондування. Його оцінка дає змогу виявляти стресові фактори, контролювати ефективність господарювання та формувати стратегічні рішення в агросекторі — як на локальному, так і на національному рівні.

2.5. Поширення хвороб та шкідників.

Поширення хвороб рослин — критичний показник стану агроєкосистем, який безпосередньо впливає на економічну ефективність господарювання, продуктивність та стабільність агроландшафтів. У контексті дистанційного зондування Землі виявлення ознак фітопатологічних змін у посівах є важливим інструментом для своєчасного реагування, усунення проблеми й зменшення втрат.

В загальному, хвороби рослин — це реакція агроєкосистеми на патогенні організми (такі як гриби, віруси та бактерії), що проявляється у вигляді зміни структури листової поверхні, некрозів, хлорозів та гальмуванні фотосинтетичної активності. Масове поширення хвороб свідчить про зниження фітосанітарної стійкості, порушення технологій або вплив несприятливих факторів середовища (таких як вологість, температура, ущільнення ґрунту тощо).

Раннє виявлення фітопатологічних проявів дозволяє зменшити обсяги застосування пестицидів, локалізувати обробку рослин і мінімізувати витрати. Технології ДЗЗ дають змогу створювати фітосанітарні карти полів, що є основою для прийняття рішень у точному землеробстві, а також дозволяють оперативно діагностувати хвороби в умовах обмеженого доступу (наприклад через війну чи складну логістику), що є критичним для збереження продовольчої безпеки.

Як виявити хвороби за допомогою методів ДЗЗ?

1. Зміна спектральних характеристик.

- Хворі рослини мають змінену здатність відбивати світло, особливо в червоному, ближньому інфрачервоному (NIR) і тепловому діапазонах. Це дозволяє виявити аномальні зони, які не відповідають нормальним фазам вегетації (Рисунок 2.10.).

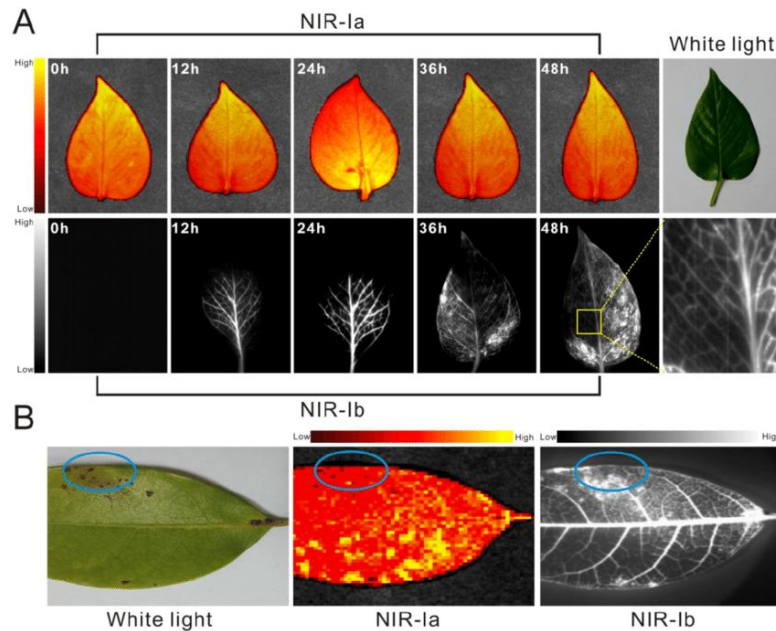


Рис.2.10. Результат використання ближнього інфрачервоного світла (NIR).

Рисунок демонструє використання різних діапазонів ближнього інфрачервоного світла (NIR) для діагностики та моніторингу стресу та захворювань рослин.

2. Зниження вегетаційних індексів

- Індeksi, такі як NDVI, RENDVI, MCARI, знижуються у тих місцях, де спостерігається стрес від хвороб. Зміна цих індексів у динаміці сигналізує про розвиток патологічного процесу (Рисунок 2.11.)

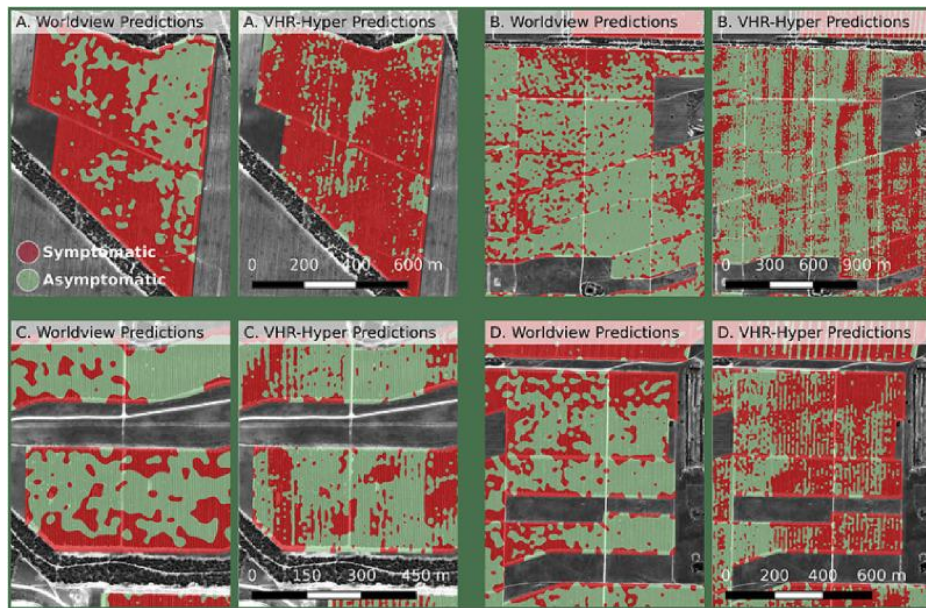


Рис.2.11. Рисунок зображує хворі рослини, або такі, що піддалися великому стресу.

Червоними є заражені ділянки, зеленими – здорові.

За результатами супутникових або дронівих знімків можна помітити кластеризацію заражень, оцінити їх площу, швидкість поширення та потенційні шляхи інфекції. Гіперспектральна зйомка дає змогу виявити спектральні підписи конкретних захворювань, ще до появи візуальних симптомів. Цей підхід перспективний для більш точного землеробства.

Поширення хвороб рослин — це чутливий і надважливий індикатор стану усєї агроєкосистеми. Сучасні методи дистанційного зондування дають змогу локалізувати, виявляти та оцінювати рівень ураження культур із високою точністю, що сприяє ефективному усунуванню усіх ризиків та збереженню аграрного потенціалу.

Поширення шкідників рослин є показовим фактором фітосанітарного стану агроєкосистем, який може суттєво впливати на врожайність, стійкість культур і загальну екологічну рівновагу. Дистанційне зондування Землі дозволяє виявляти та моніторити активність шкідників безпосередньо через індикативні зміни у фізіологічному стані рослин.

Атаки шкідників, таких як комахи (наприклад попелиці, трипси), кліщі або ґрунтові організми, викликають (рисунок 2.12.):

- Уповільнення росту;

- Передчасне в'янення або пожовтіння;
- Зменшення площі асиміляційної поверхні листя;
- Ураження плодів і насіння.

Ці зміни, у свою чергу, впливають на спектральні характеристики рослинного покриву, що й робить можливим їх виявлення за допомогою ДЗЗ. Індекси як-от SAVI, NDVI, RENDVI реагують на зниження хлорофілу та порушення фотосинтезу, що часто є результатом харчування комахами. Ураження, спричинене шкідниками, має характерну мозаїчність або концентричну локалізацію, що добре виявляється на знімках високої роздільної здатності (наприклад PlanetScore або дроніві дані). Також, уражені рослини можуть мати підвищену або знижену температуру, залежно від порушення транспірації, це дає можливість фіксувати стрес за допомогою інфрачервоної зйомки.

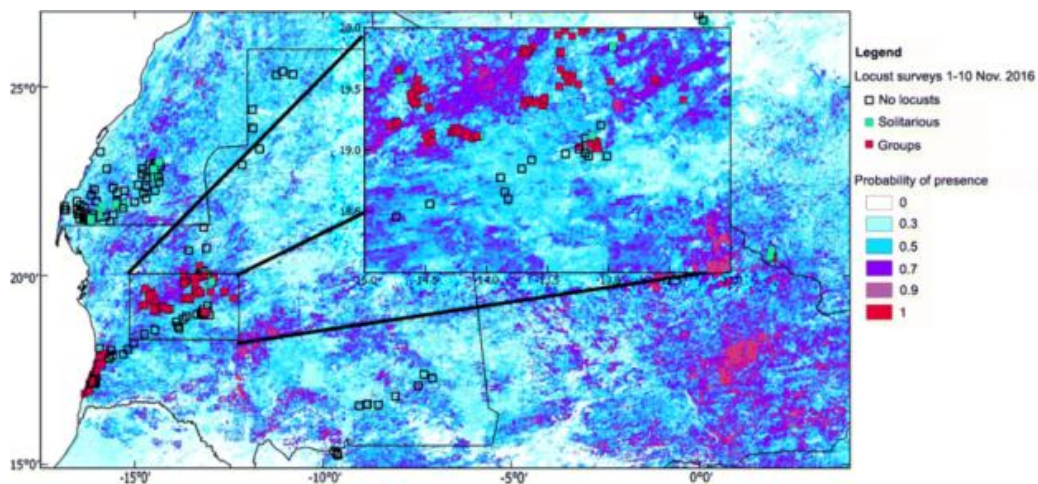


Рис.2.12.Показує зараження, а також ймовірне зараження, Сараною (Locust). Білі квадрати показують, що після проведених обстежень Сарану виявлено не було; зелені – що вона була, але в невеликих кількостях окремо одна від одной; червоні – показують скупчення груп Сарани, що є найбільш небезпечним для сільськогосподарських угідь.[12]

Поширення шкідників є найменш передбачуваним, але критично важливим чинником, що впливають на стан агроecosystem. Хоча дистанційне зондування не дає змоги виявити шкідників напряду, воно ефективно ідентифікує наслідки їх дії —

стресові прояви у рослинному покриві, що дозволяє аграріям та науковцям вчасно реагувати, приймати обґрунтовані рішення та запобігати масовим втратам урожаю.

2.6. Зони ерозії ґрунтів.

Термін “ерозія ґрунтів” охоплює доволі широкий спектр фізичних і хімічних впливів, таких як видалення розчинних речовин, руйнування через мороз або швидкі зміни температури, хімічні зміни, стирання під дією вітру, зарядженого пилом[2]. Також, через те, що щільність населення постійно зростає, люди роблять негативний внесок у виникнення ерозії в результаті обробки полів, надмірного вирубування лісів та будівництво доріг (Рисунок 2.13.).

Ґрунт є основним ресурсом агроecosystem. Його родючість, водоутримувальна здатність, структура та біологічна активність визначають теперішній та майбутній потенціал вирощування культур. Ерозія може привести до таких жахливих наслідків як:

- зменшення вмісту гумусу;
- погіршення водного та мінерального балансу ґрунту;
- зникнення біорізноманіття мікроорганізмів;
- зниження врожайності.

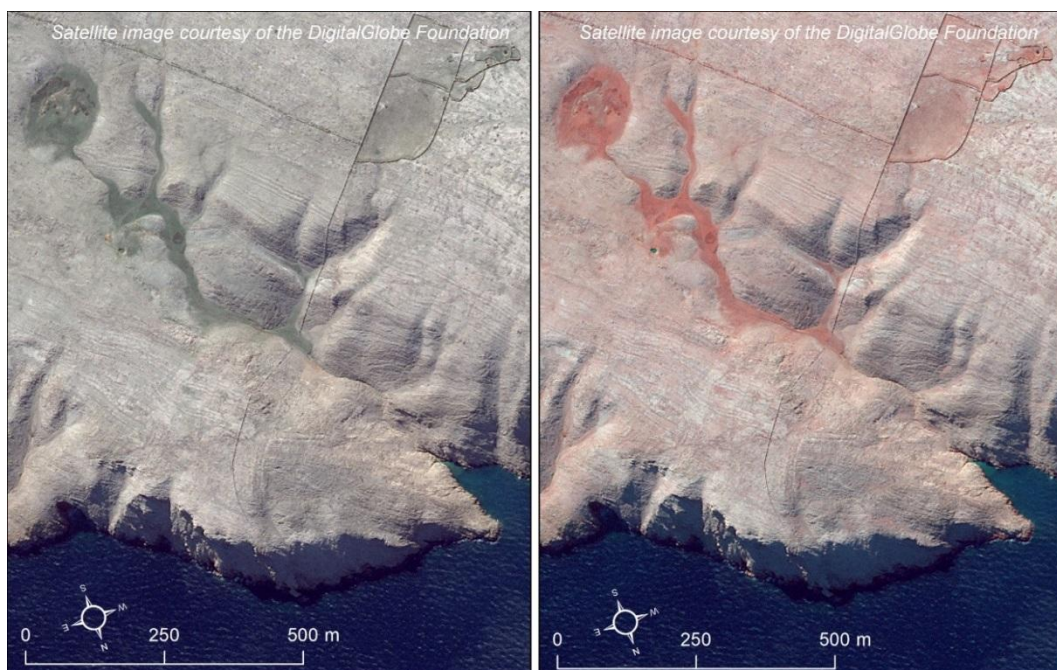


Рис.2.13. Зображення показує ерозію ґрунту, що спричинена водними процесами, де червоний колір – це відкладення нових осадів, мулу.

Виявлення ерозійних зон дозволяє вчасно впроваджувати протиерозійні заходи: залуження, мульчування, змінити напрямок обробітку ґрунту, лісосмуги тощо. Дає змогу оптимізувати землекористування, обмежуючи обробіток у зонах потенційного ризику.

Ерозія ґрунтів є небезпечним деградаційним процесом в агроекосистемах, який має довготривалі наслідки. Застосування дистанційного зондування Землі дає змогу виявляти, спостерігати та оцінювати масштаби ерозії на великих територіях та з високою точністю, забезпечуючи правильне управління земельними ресурсами. У поєднанні з ГІС і сучасними аналітичними методами ДЗЗ стає основою для системного контролю стану ґрунтів у сільському господарстві.

РОЗДІЛ 3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ (ОПТИЧНИХ, РАДАРНИХ, МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ) ДЛЯ АНАЛІЗУ АГРОЕКОСИСТЕМ.

Велике різноманіття джерел супутникових даних, що відрізняються за типами сенсорів, дозволяє отримувати інформацію з різною спектральною, просторовою, часовою та радіометричною роздільною здатністю. Найбільш поширеними є оптичні, радарні та мультиспектральні (а також гіперспектральні) дані. Кожен із цих типів має свої обмеження та функціональні особливості, які визначають їхню доцільність для певних задач агроекологічного аналізу.

Оптичні дані надають високу точність візуалізації та дозволяють спостерігати за динамікою вегетаційних процесів, але є залежними від атмосферних умов. Радарні дані формуються на основі активного мікрохвильового зондування та інформативними навіть вночі та за будь-яких погодних умов, що робить їх цінними для щоденного моніторингу або моніторингу в потрібний час. Мультиспектральні дані дозволяють розрізняти властивості рослинного покриву з високою точністю, відкриваючи можливості для глибокого аналізу фізіологічних та біохімічних показників сільськогосподарських культур.

Нижче розглянемо кожне джерело супутникових даних окремо, та поговоримо про їх переваги та недоліки.

3.1. Оптичні дані.

Оптичні супутникові дані — зображення земної поверхні, отримане шляхом реєстрації сонячного випромінювання, яке відбивається об'єктами. Ці дані охоплюють видимий, ближній інфрачервоний (NIR) і короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) діапазони спектра. У дистанційному зондуванні землі оптичні сенсори дозволяють отримувати мультиспектральні або гіперспектральні зображення, які дають можливість ідентифікувати об'єкти за їх спектральними ознаками.

Ефективність оптичних супутникових даних у ДЗЗ є дуже високою, особливо в контексті моніторингу рослинності, класифікації культур, оцінки стану посівів і прогнозуванні врожайності. Проте ця ефективність залежить від ряду факторів, наприклад спектральних характеристик, погодних умов, просторової та часової роздільності, а також цілей дослідження.

Серед основних властивостей та переваг оптичних даних можна виділити:

- Спектральна роздільна здатність, що надає можливість фіксації відбитого випромінювання у вузьких спектральних діапазонах — це дозволяє відрізнити об'єкти за типом рослинності, ступенем вологості та вегетації, тощо.
- Просторова роздільна здатність, що коливається від кількох метрів (напр. PlanetScope) до 30м (напр. Landsat) або більше — що визначає рівень деталізації зображення.
- Часова роздільна здатність визначає, як часто можна отримати зображення для певної території — це важливо для моніторингу змін у динаміці.
- Залежність від погодних умов, що є основним обмеженням. Оптичні сенсори не можуть «бачити» крізь хмари, дим або в темну пору доби.

Джерела оптичних даних перелічено в таблиці 3.1., а рисунки 3.1 та 3.2 є прикладом використання цих джерел.

Таблиця 3.1. Джерела оптичних даних.

Супутникова платформа	Організація	Просторова роздільність	Часовий інтервал	Доступність
Landsat-8/9	NASA/USGS	15 м-30 м	До 16 дні	Безкоштовно
Sentinel-2A/B	ESA (Copernicus)	10 м -60 м	5 днів	Безкоштовно
MODIS (Terra/Aqua)	NASA	250 м- 1 км	Щоденно	Безкоштовно
PlanetScope (Dove)	Planet Labs	До 3 м	1 день	Комерційно

WorldView-2/3	Maxar	0,3-12 м	1-4 дні	Комерційно
---------------	-------	----------	---------	------------

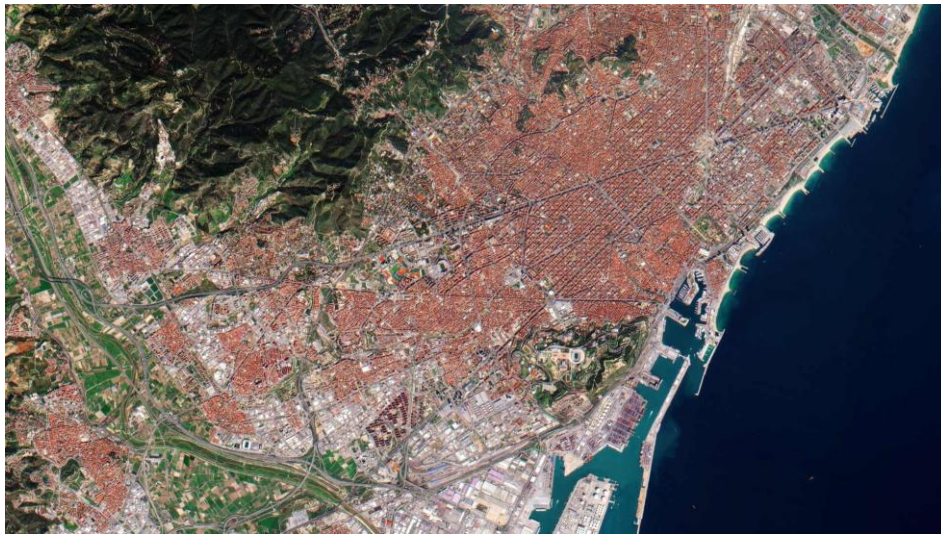


Рис.3.1. Приклад супутникового знімку з супутника Landsat-8.

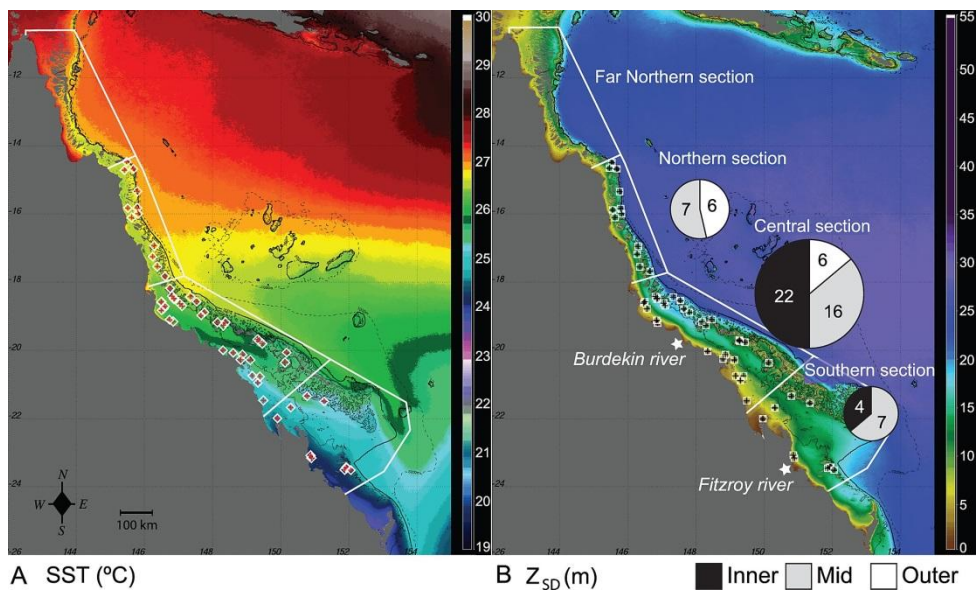


Рис.3.2. Приклад супутникового знімку з супутника MODIS

Застосування оптичних супутникових даних в агросфері вирішує багато завдань у сфері агромоніторингу. Наприклад:

- Розрахунок вегетаційних індексів (SAVI, EVI, NDVI, GNDVI тощо), які пов'язані із вмістом хлорофілу, біомасою та ступенем активності фотосинтезу.
- Виявлення посух, нестачі вологи, термічного стресу, хвороб або шкідників.

- Моніторинг розвитку культур упродовж усього вегетаційного періоду. Розпізнавання аномальних зон зниження вегетаційної активності.
- Класифікація сільськогосподарських культур за їх спектральними ознаками.
- Моделювання прогнозів врожаю на основі рослинного покриву в ключові фази розвитку культур. Визначення меж полів, оцінка змін сівозміни, визначення структури посівних площ.
- Поєднання з даними метеорологічних моделей для прогнозного аналізу. Створення аграрних карт, зручних для прийняття управлінських рішень.

Оптичні супутникові дані є високоефективним джерелом інформації для аналізу агроєкосистем, особливо у сфері моніторингу стану рослинності, підтримки точного землеробства і класифікації культур. Їх ефективність може бути ще вищою при інтеграції з іншими типами даних, наприклад гіперспектральними (для тонкого спектрального аналізу), радарними (для обходу погодних обмежень) та польовими спостереженнями.

3.2. Радарні дані (SAR).

SAR (Synthetic Aperture Radar, радар із синтезованою апертурою) — активна система дистанційного зондування, що використовує мікрохвильове випромінювання для спостереження за землею поверхнею. На відміну від оптичних сенсорів, SAR не залежить від сонячного освітлення і здатен «бачити» крізь хмари, дим і туман, в темну пору доби. Це дає можливість отримувати точні дані незалежно від погодних умов і часу доби, що робить SAR надзвичайно ефективним для щоденного моніторингу агроєкосистем.

SAR є надзвичайно ефективними для дистанційного зондування агроєкосистем, особливо в умовах, коли оптичні дані отримати важче, ніж зазвичай (наприклад через хмарність, туман або темний час доби). Ефективність SAR визначається його унікальними фізичними властивостями та здатністю доповнювати або навіть замінювати інші типи даних у специфічних аграрних завданнях. Серед основних переваг можна виділити такі:

- SAR-дані не чутливі до снігу, дощу, хмарності або туману.

- Можливість отримання стабільних даних у тропічних, гірських або північних регіонах з постійною хмарністю.
- SAR добре відображає мікроструктуру поверхні, вологість ґрунту, густоту та структуру рослинного покриву.
- Один із найбільш ефективних інструментів для картування вологості верхнього шару ґрунту (0–5 см) з просторовою роздільністю до 10 м. Це важливо для управління зрошенням і раннього попередження посух.
- Сучасні SAR-супутники (наприклад Sentinel-1) забезпечують роздільність до 5 м з періодичністю до 6 днів. TerraSAR-X та інші комерційні місії можуть надавати дані з роздільністю до 1 м.

Джерела SAR-даних зазначено в таблиці 3.2, а приклади використання таких джерел позначено на рисунках 3.3 та 3.4.

Таблиця 3.2. Джерела SAR-даних.

Супутник/Місія	Організація	Частота (діапазон)	Просторова роздільність	Часовий інтервал	Доступність
Sentinel-1A/B	ESA (Copernicus)	C-діапазон	5 м – 20 м	До 6 днів	Безкоштовно
RADARSAT-2	CSA	C-діапазон	До 3 м	До 24 днів	Частково комерційно
TerraSAR-X/ TanDEM-X	DLR/Airbus	X-діапазон	До 1 м	До 11 днів	Комерційно
SAOCOM 1A/1B	CONAE/ASI	L-діапазон	10-100 м	До 8 днів	Частково безкоштовно
ALOS-2 (PALSAR-2)	JAXA	L-діапазон	До 10 м	14-46 днів	Частково безкоштовно



Рис.3.3. Приклад супутникового знімку з супутника SAOCOM 1A.

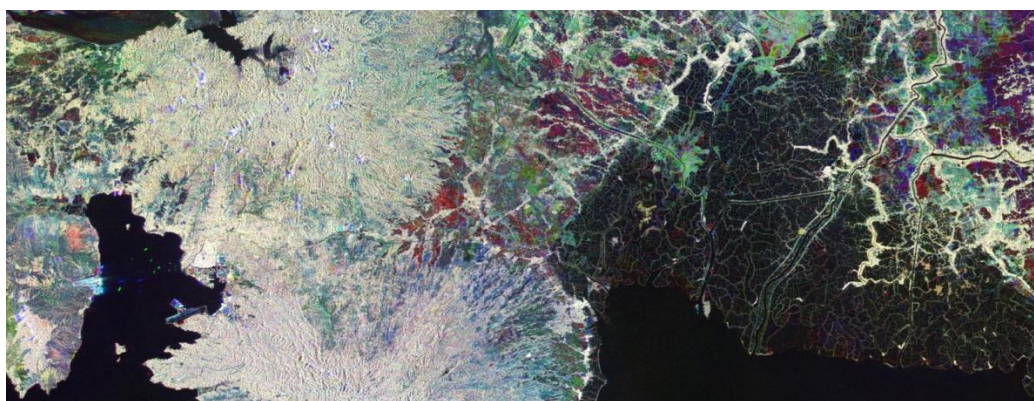


Рис.3.4. Приклад супутникового знімку з супутника ALOS-2.

Застосування SAR-даних в агросфері вирішує багато завдань у сфері агромоніторингу. Особливо таких, як:

- Оцінка вологості ґрунту на глибині до 5 см з точністю 3–5%, що дуже важливо для управління зрошенням, прогнозування врожаю та раннього виявлення посух.
- SAR, за рахунок зворотного розсіювання, виявляє нерівності поверхні, наявність залишків рослинності, обробленість ґрунту. Може визначати зміни структури поверхні навіть при мінімальному спектральному контрасті.

- SAR-фактор зростає з підвищенням біомаси: чим більше зеленої маси — тим інтенсивніше зворотне розсіювання. Дозволяє визначити фази росту культур (посів, цвітіння, дозрівання, кущення) на основі зміни радарного сигналу.
- Поєднання SAR з оптичними даними значно підвищує точність розпізнавання культур (>90%). Використання поляриметрії дозволяє класифікувати рослинність за структурними параметрами (такими як висота, густина, форма).
- SAR дозволяє фіксувати підтоплення, зсуви, ураження буревіями або градом за умов хмарності. Карти вологості та структури ґрунту з SAR-даних інтегруються в агроГІС-системи.

Радарні супутникові дані (SAR) є ефективним доповненням до оптичного моніторингу агроєкосистем, що забезпечує унікальну можливість спостереження за вологістю, структурою полів і розвитком культур за будь-яких погодних умов. В умовах хмарного клімату, складної топографії або обмеженого доступу до оптичних даних, SAR дозволяє підтримувати безперервний моніторинг, зберігаючи достовірність та просторову деталізацію даних.

3.3. Мультиспектральні дані.

Мультиспектральні дані — це результат дистанційного зондування, отриманий з сенсорів, що реєструють електромагнітне випромінювання в кількох (зазвичай це 3–15) чітко визначених спектральних діапазонах (смугах), включаючи видиме світло (синій, зелений, червоний), ближню інфрачервону область (NIR), короткохвильову інфрачервону (SWIR) та іноді ультрафіолетову чи теплову інфрачервону (TIR).

Мультиспектральні супутникові дані є одними з найефективніших джерел інформації для моніторингу агроєкосистем. Їх ефективність пояснюється тим, що вони забезпечують прямий спектральний відгук рослинного покриву, що дає змогу оцінювати біофізіологічний стан культур, прогнозувати врожайність з високою достовірністю та виявляти аномалії. Серед основних переваг мультиспектральних даних можна виділити:

- Мультиспектральні сенсори охоплюють критичні діапазони (особливо Red Edge та NIR), які є дуже чутливими до вмісту хлорофілу, структурних змін у листовому апараті, ступеня фотосинтетичної активності. Це, в свою чергу, дозволяє виявляти стрес рослин на ранніх стадіях (до появи візуальних симптомів) та розрізняти фази росту, навіть якщо вони близькі за зовнішніми ознаками.
- Базові та вдосконалені вегетаційні індекси (SAVI, NDRE, NDVI, GNDVI тощо) дозволяють оцінювати біомасу з похибкою <10%, класифікувати сільськогосподарські культури з точністю 85–98%, особливо при поєднанні з алгоритмами машинного навчання, моніторити врожайність з точністю 80–95%.
- Висока просторово-часова роздільність, де Sentinel-2 дає змогу створювати повноцінні часові ряди для аналізу фенології та темпів росту культур (10–20 м кожні 5 днів), а PlanetScore забезпечує детальний моніторинг змін на рівні окремих полів (3–5 м щодня).
- Мультиспектральні дані можуть бути оброблені автоматично на великих територіях, особливо в поєднанні з агро-ІТ платформами, ГІС-аналітикою та штучним інтелектом.

Інформаційні джерела мультиспектральних даних перелічені в таблиці 3.3., а приклад роботи з такими джерелами показано на рисунках 3.5. та 3.6.

Таблиця 3.3. Джерела мультиспектральних даних.

Платформа	Організація	Кількість смуг	Просторова роздільність	Часовий інтервал	Доступність
Landsat 8/9	NASA / USGS	11	15-30 м	16 днів	Безкоштовно
Sentinel-2A/B	ESA (Copernicus)	13	10-60 м	5 днів	Безкоштовно

PlanetScope (Dove)	Planet Labs	4	3-5 м	Щодня	Комерційно
WorldView-2/3	Maxar	8/16	До 1.24 м	1-3 дні	Комерційно
RapidEye (архів)	Planet Labs (архів)	5	5 м	1 день	Архівні дані
MODIS (Terra/Aqua)	NASA	36	250-1000 м	Щодня	Безкоштовно

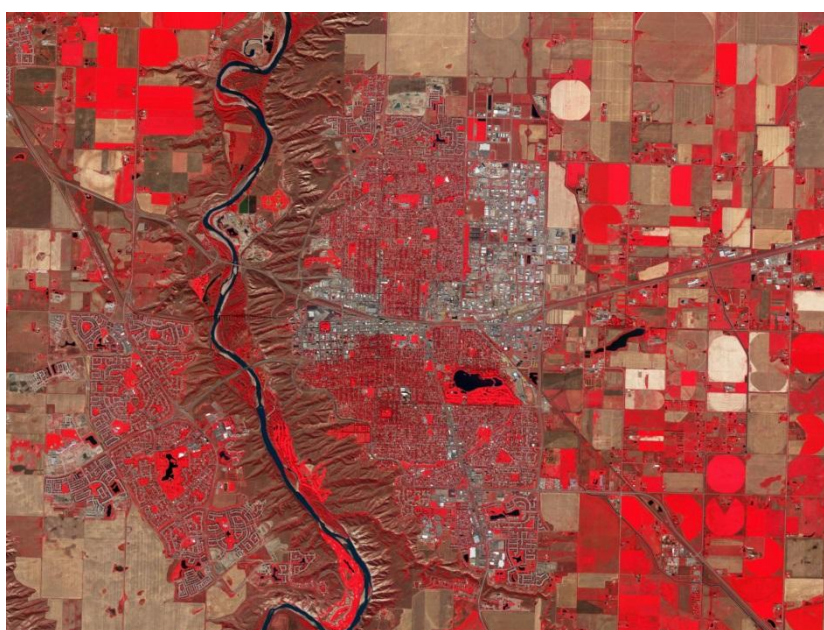


Рис.3.5. Приклад опрацьованого супутникового знімку з супутника RapidEye.

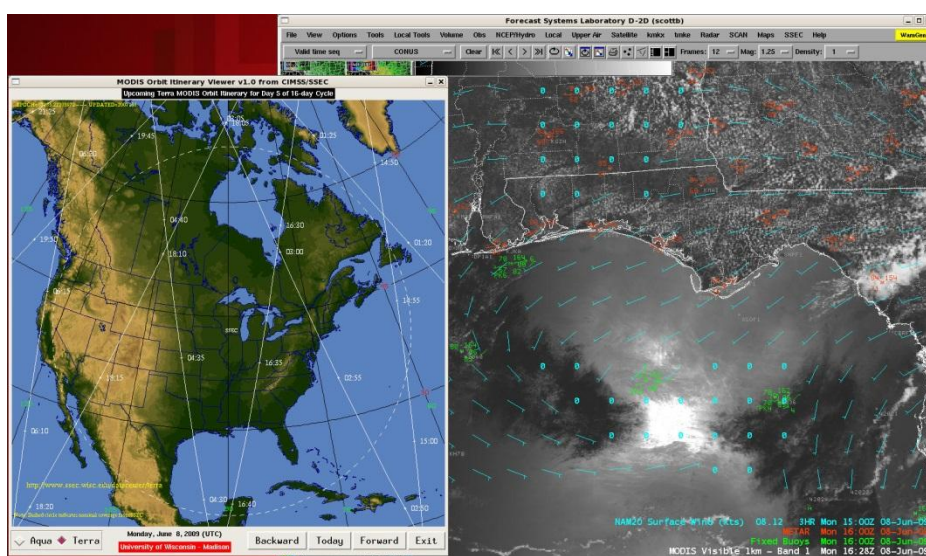


Рис.3.6. Принцип роботи з супутниковим знітком з супутника MODIS.

Цілі застосування джерел мультиспектральних даних в агросфері з урахування ДЗЗ можна охарактеризувати так:

- Використання вегетаційних індексів NDVI, EVI, SAVI, GNDVI. Побудова кривих росту за часовими рядами NDVI;
- Визначення фотосинтетичної активності, хлорофільного вмісту та біомаси, стресу;
- Автоматичне розпізнавання типів рослинних угідь за мультиспектральною сигнатурою;
- Фенологічний аналіз — виявлення стадій посіву, цвітіння, кущення, дозрівання, збирання врожаю;
- Виявлення зон уражених шкідниками, хворобами або нестачею вологи / поживних речовин. NDRE, PSRI індекси використовуються для ідентифікації фізіологічного стресу;
- Використання алгоритмів машинного навчання (Random Forest, SVM, CNN) для розділення культур за спектральними ознаками;
- Побудова моделей урожайності на основі динаміки NDVI, опадів і температури. Інтеграція з агрометеорологічними даними й польовими обстеженнями;
- Індиректна оцінка вологості, структури ґрунту, вмісту органічної речовини на основі спектральної відповіді SWIR/NIR. Класифікація ґрунтів на основі довготривалих мультиспектральних спостережень.

Мультиспектральні супутникові дані є основою дистанційного моніторингу агроєкосистем, завдяки своїй здатності точно характеризувати стан, динаміку і тип рослинного покриву[13]. Поєднання з іншими типами ДЗЗ-даних — такими як SAR або гіперспектральна зйомка — значно підвищує точність і аналітичну силу агромоніторингу. Ефективність таких підвищується при регулярному зборі, наявності польових даних для калібрування та інтеграції з іншими джерелами (SAR, метео, ґрунтові дані)

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ АГРОЕКОСИСТЕМ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ.

Аналіз агроєкосистем за допомогою супутникових знімків базується на можливості дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) реєструвати відбиття сонячного або штучного випромінювання від поверхні об'єктів, зокрема сільськогосподарських угідь. Це дозволяє отримувати дані про фізичні, хімічні та біологічні властивості рослинного покриву, ґрунтів і навколишнього середовища.

Супутникові знімки є ефективним інструментом для неінвазивного дослідження агроєкосистем, оскільки забезпечують регулярну, точну та об'єктивну інформацію про стан посівів без потреби у постійному проведенні польових робіт. Інтеграція супутникових даних із геоінформаційними системами (ГІС) та аналітичними алгоритмами дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо управління сільськогосподарськими землями, планування аграрної політики та оцінки екологічної стійкості територій.

4.1. Характеристика чорноземів Маловиськівського району Кіровоградської області .

Місцем для проведення досліджень в даній роботі був обраний Маловиськівський район Кіровоградської області (Рисунок 4.1).

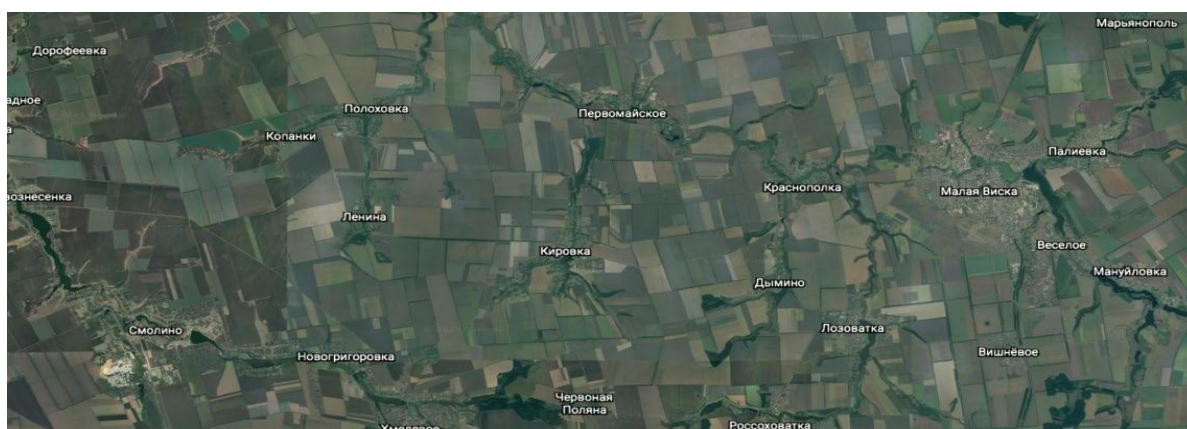


Рис.4.1. Знімок досліджуваної території Маловиськівського району в Google Earth

Рельєф Кіровоградської області переважно сформувався під впливом ерозійних процесів. Найпоширенішими формами рельєфу є вододільні плато, річкові долини, яри та балки. Одним із головних природних багатств регіону є родючі чорноземні ґрунти (рис. 4.2). За рівнем природної родючості область займає четверте місце в Україні. Ґрунтовий покрив Кіровоградщини відображає її розташування в перехідній зоні між південним лісостепом і північним степом, що зумовило велику різноманітність — понад 50 різновидів ґрунтів. Під різотравно-типчаково-ковилувими степами утворилися звичайні чорноземи.

Клімат області помірно-континентальний, недостатньо вологий, з чітко вираженими порами року. Середньорічна температура повітря становить 7–8 °С. Зими м'які, малосніжні, з частими відлигами. У найхолодніший період зими (січень-лютий) середньомісячна температура становить –5...–8 °С. Часті перепади температур взимку призводять до утворення туманів і ожеледиці. Протягом року спостерігаються сильні вітри зі швидкістю понад 15 м/с. Для осінньо-літнього періоду характерні бурі та урагани зі швидкістю 25–30 м/с.

В основі геологічної будови області лежить докембрійський кристалічний фундамент, розділений розломами на окремі блоки — Кіровоградський та Білоцерківсько-Одеський.

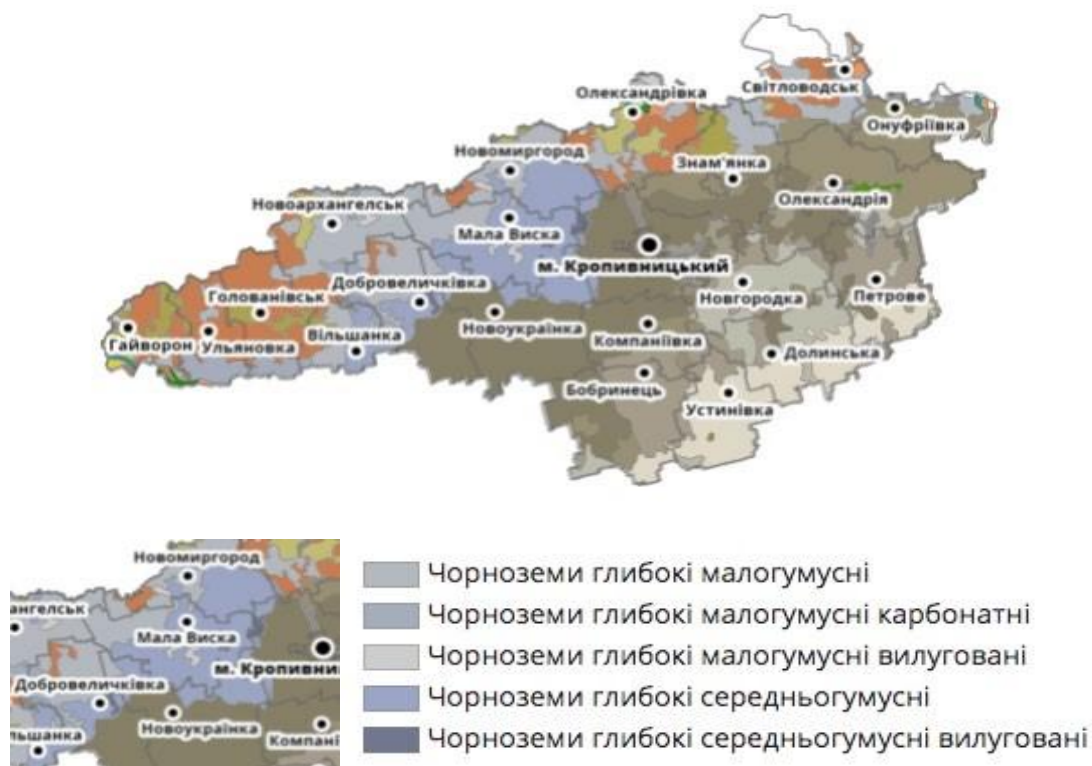


Рис.4.2. Карта ґрунтів Маловиськівського району Кіровоградської області

Саме це зумовлює багатство та різноманіття мінеральних ресурсів області. У її надрах виявлено 31 вид корисних копалин, відкрито 390 родовищ, з яких на сьогодні активно розробляється 71. Мінерально-сировинна база представлена паливно-енергетичними ресурсами (уранова руда, буре вугілля, горючі сланці), сировиною для металургійної промисловості (залізна руда, нікель, кобальт), будівельними матеріалами (граніти червоного, рожевого та сірого кольорів, піски, сировина для виготовлення цегли тощо), а також підземними водами, графітом та іншими корисними копалинами.

Ґрунти області характеризуються високою природною родючістю. Ґрунтовий покрив формується в умовах перехідної зони між південним лісостепом і північним степом.

У північній частині області переважають потужні малогумусні чорноземи з вмістом гумусу близько 5%, а також середньогумусні — із вмістом гумусу понад 5,5%. Значні площі займають деградовані чорноземи, а також опідзолені чорноземи, темно-сірі та сірі опідзолені ґрунти.

У південно-східних районах області найбільш поширеними є звичайні чорноземи середньо- та малогумусного типу, а на півдні — малогумусні, малопотужні чорноземи.

За механічним складом ґрунти північної частини області є важкосуглинковими, південної — легкосуглинковими, а на території Придніпров'я переважають легко- та середньосуглинкові ґрунти.

4.2. Побудова тематичної карти деградаційних процесів.

Для картографування земельного покриву зазвичай використовують два основні методи. Перший — це комп'ютерна класифікація, за якою окремі пікселі або їхні групи автоматично відносяться до певних класів ґрунтового покриву за допомогою спеціального програмного забезпечення або класифікаторів. Другий метод — візуальна інтерпретація зображень.

Для систематизації алгоритмів комп'ютерної класифікації застосовують різні підходи, одним із яких є поділ на контрольовану та неконтрольовану класифікацію залежно від ступеня участі людини у процесі.

Контрольована класифікація передбачає попереднє визначення спектральних характеристик кожного класу покриву. Ці характеристики використовуються комп'ютером для автоматичного віднесення кожного пікселя до відповідного класу. Для цього необхідно сформувати навчальну вибірку пікселів, яка має бути репрезентативною для всіх класів. Такі навчальні дані зазвичай отримують на основі підсупутникових спостережень. Результатом контрольованої класифікації є тематична карта, на якій кожен піксель позначено відповідно до свого класу земельного покриву.

Кожен із методів класифікації має свої плюси і мінуси. Зокрема, неконтрольовану класифікацію можна виконувати ще до збору наземних даних, адже її результати допомагають оцінити, наскільки чітко класи покриву можна розмежувати за спектральними характеристиками.

4.2.1. Обробка знімків.

У дослідженні використовувалися дані, отримані із супутників Sentinel-2A та Sentinel-2B, для оцінки процесів деградації ґрунтово-рослинного покриву на досліджуваній території. Одним із найсучасніших і найбільш ефективних методів отримання актуальної інформації про властивості, стан і характеристики сільськогосподарських земель є гіперспектральна зйомка. Основною особливістю таких даних є наявність великої кількості спектральних каналів.

Обробка супутникових знімків Sentinel-2 (рис. 4.3) здійснювалася з використанням програмного комплексу ENVI.

У ході дослідження за допомогою індикаторів було визначено зміни рослинного покриву та динаміку ерозійних процесів ґрунтів. Для створення картографічних матеріалів з відображенням цих індикаторів, крім багатоспектральних супутникових знімків середнього просторового розрізнення, використовували також додаткові геопросторові дані — цифрову модель рельєфу місцевості, карти та характеристики ґрунтів, а також кліматичні показники досліджуваної території.

Головною метою обробки багатоспектральних супутникових знімків було отримання максимально достовірної інформації, що відображає процеси деградації земель.

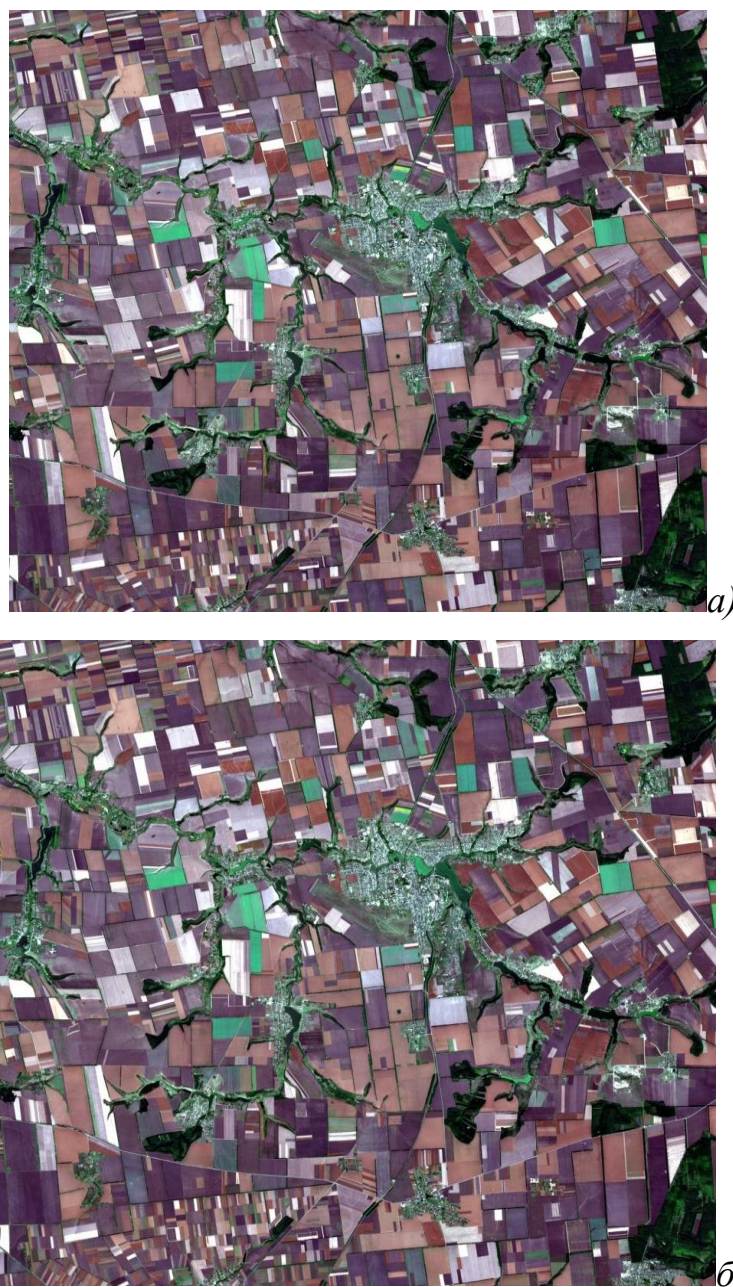


Рис. 4.3. Вихідні знімки з КА Sentinel-2 за 2018(a) і 2024(б) роки

4.2.2. Побудова карти.

Для створення фінальної карти деградації земель використовувалися допоміжні дані: карта зміни вегетаційного індексу (рис. 4.4) та карта зміни ерозії ґрунтів (рис. 4.5). При цьому враховувалися коефіцієнти щільності, ерозійності та структурованості ґрунту, типові для цієї території (табл. 4.1). Позначення класів індикаторів деградації представлені в табл. 4.2. Процес створення підсумкової карти деградації земель досліджуваного району можна проілюструвати за допомогою супутникових зображень та тематичних шарів.

Нормалізований відносний індекс рослинності (NDVI) — це показник, що відображає кількість фотосинтетично активної біомаси. Він розраховується на основі поглинання та відбиття рослинами світла червоної та ближньої інфрачервоної зон спектру. Значення NDVI для рослинності зазвичай коливаються від 0,2 до 0,95. Чим краще розвинена рослинність під час вегетації, тим вище значення NDVI, що дозволяє оцінювати розвиток зеленої маси рослин.

Обчислюється за наступною формулою (4.1.):

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (4.1)$$

де *NIR* – відображення в ближній інфрачервоній області спектра; *RED* – відображення в червоній області спектра.

Розрахунок NDVI ґрунтується на двох найбільш стабільних ділянках спектральної кривої, що відбиває випромінювання судинних рослин. У червоній області спектра (0,6-0,7 мкм) спостерігається максимальне поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин. Водночас, у інфрачервоній області (0,7-1,0 мкм) відбувається максимальне відбиття клітинними структурами листя.

Отже, чим вищою є фотосинтетична активність (що зазвичай пов'язано з густою рослинністю), тим менше світла відбивається у червоній частині спектра і більше – в інфрачервоній.



Рис. 4.4. Карта зміни вегетаційного індексу за період 2018-2024 р.р



Рис. 4.5. Карта зміни ерозії ґрунтів

Таблиця 4.1. Коефіцієнти типових для даної території ґрунтів

Тип ґрунту	Щільність	Розмір структурних часток ґрунту	Ерозійний фактор	Гідрологічний показник ґрунту
Чорнозем глибокий середньогумусний	1.2-1.4 г/см ³	0.5 мм	0.28 мм/міс-1	85
Чорнозем глибокий малогумусний вилугований	1.1-1.3 г/см ³	0.5 мм	0.28 мм/міс-1	74

Співвідношення показників відбиття світла дозволяє не лише відрізнити рослинність від інших об'єктів, а й детально її аналізувати. Використання нормалізованої різниці між мінімальним і максимальним відбиттям, замість простого співвідношення, значно підвищує точність вимірювань. Це допомагає зменшити вплив таких факторів, як нерівномірне освітлення на знімках, хмарність, серпанок чи атмосферне поглинання радіації. NDVI можна розрахувати на основі знімків будь-якої роздільної здатності (високої, середньої або низької), якщо вони містять спектральні канали в червоному (0,55–0,75 мкм) та ближньому інфрачервоному (0,75–1,0 мкм) діапазонах. З моменту створення алгоритму NDVI з'явилося багато його модифікацій, спрямованих на мінімізацію впливу різних перешкоджаючих факторів.

Найбільш активно використовуваним, з ґрунтових індексів, можна вважати модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс – MSAVI (4.2.).

$$MSAVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED+L} * (1 + L), \quad (4.2.)$$

де, $L=[0;1]$, $L=0$ для найбільшого індексу залистнення, $L=1$ для найменшого, оптимальне значення $L=0,5$; $L+1$ – добутковий фактор, присутній в MSAVI призводить до того, що їх значення варіюються від -1 до 1 , введений для того, щоб призвести ці індекси до виду NDVI при L , направленому до 0 .

Згідно зі створеною картою зміни вегетаційного індексу, більша частина досліджуваної території не зазнала суттєвих змін у період з 2018 по 2024 роки. На значній площі навіть спостерігається покращення стану рослинності. Лише невелика частина території за цей період продемонструвала середню та сильну деградацію рослинного покриву.

Ерозія ґрунтів є ключовим індикатором деградації. Наприклад, водну ерозію можна розрахувати за формулою (4.3), використовуючи непрямий індекс вегетаційного стану. Для територій з інтенсивною водною ерозією характерний низький вегетаційний індекс. Деградовані та мінералізовані ґрунти, своєю чергою, демонструють вищу енергетичну яскравість у видимому спектральному діапазоні. Загалом, зменшення щільності вегетаційного покриву є важливою ознакою деградації земель.

$$z_s = k_s Q^2 (\operatorname{tg} \alpha)^{1,67} \exp(-0,07v) \quad (4.3)$$

де k_s — ерозійний коефіцієнт ґрунту; Q — по-верхневий стік (мм/міс); α — кут нахилу місцевості; v — відсоток покриття місцевості рослинністю.

Поверхневий стік визначається співвідношенням кількості опадів P (мм/міс) та водним утриманням R (мм/міс) за формулою 4.4:

$$Q = \frac{(P-0,2R)^2}{P+0,8R} \quad (4.4)$$

де R (4.5) залежить від табличного гідрологічного показника ґрунту C (табл. 1).

$$R = 25,4 \left(\frac{1000}{C} - 10 \right) \quad (4.5)$$

Вітрова ерозія виникає у результаті взаємодії структурних частин ґрунту із приземним повітряним потоком.

Спрощена модель вітрової ерозії може бути зображена за формулою 4.6:

$$z_w \approx 0.059 (w - u) d_s^{-3,67}, \quad (4.6)$$

де z_w — величина вітрової ерозії, мм/міс; w — швидкість приземного повітряного потоку, м/с; u — критична швидкість повітряного потоку, м/с

$$u = 3,202 + 0,25d_s, (4.7)$$

тут d_s – еквівалентний розмір структурних частинок ґрунту, мм.

Швидкість приземного повітряного потоку (4.8) при сталій динамічній швидкості вітру w_0 визначається переважно опором рослинного покриву:

$$w = w_0 \exp(-0,0139v), (4.8)$$

Повна ерозія ґрунту визначається додаванням (4.3) та (4.6).

Наступний етап дослідження полягав у об'єднанні часткових класифікацій першого рівня в єдину результуючу класифікацію. Для цього ми використали метод баєсівського злиття даних.

Результати, отримані при зіставленні карт (рис. 4.4 та рис. 4.5), були відображені на карті деградації земель (рис. 4.6). Отримані значення ми розділили на сім класів:

- Перші три класи (значне покращення, середнє покращення, слабке покращення) відображають позитивні тенденції зміни показників якості ґрунтового покриву. Це свідчить про зниження ризику погіршення якості земель.
- Четвертий клас ("без змін") представляє території, де протягом 2018-2024 років не відбувалося значних змін.
- Інші три класи позначають території з негативними змінами та вказують на низький, середній або високий ризик деградації земель.

Таблиця 4.2. Позначення класів індикаторів розвитку деградаційних процесів.

Позначення	Клас
	Значне покращення
	Середнє покращення
	Слабке покращення
	Без змін
	Низька деградація
	Середня деградація


	Сильна деградація
---	-------------------



Рис. 4.6. Фрагмент карти деградації земель Маловиськівського району

Отримана карта деградації ґрунтів дає змогу відстежувати тенденції деградаційних процесів на досліджуваній території. Приємно відзначити, що значна частина площі не зазнала суттєвих змін, а на досить великій її частині навіть спостерігається покращення стану ґрунтового покриву.

Мультиспектральні космічні знімки є ефективним інструментом для вивчення показників погіршення якості земель та визначення змін у ризику їхньої деградації. Вони дозволяють аналізувати великі території протягом певного періоду часу.

Для дослідження деградаційних процесів дистанційним методом було обрано Маловиськівський район Кіровоградської області. Ця територія є особливо цікавою для досліджень завдяки її родючим чорноземним ґрунтам, що становлять справжнє багатство регіону.

Для створення фінальної карти деградації земель були використані допоміжні карти, зокрема карта зміни вегетаційного індексу та карта зміни ерозії ґрунтів. Основою для цих карт слугували мультиспектральні знімки із супутників Sentinel-2A та Sentinel-2B.

Створена карта деградації наочно демонструє деградаційні процеси на досліджуваній території. Переважна більшість площі залишається незмінною або ж

зазнає лише незначних змін. І тільки невелика частина території характеризується середнім та високим ступенем ерозії.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є невід'ємною частиною будь-якої діяльності, спрямованої на створення безпечних і здорових умов праці. Її головна мета — запобігти нещасним випадкам на виробництві, професійним захворюванням та іншим ризикам, що можуть загрожувати життю та здоров'ю працівників. Це досягається шляхом розробки та впровадження комплексу правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів.

Безпека праці починається з ретельного аналізу потенційних ризиків на робочому місці. Кожен працівник має бути забезпечений необхідними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), які відповідають специфіці виконуваних робіт. Це може бути спеціальний одяг, взуття, захисні окуляри, рукавички, каски тощо.

Регулярне навчання та інструктажі з охорони праці є обов'язковими для всіх працівників, незалежно від їхнього стажу чи посади. Ці заходи допомагають ознайомити персонал з правилами безпечного виконання робіт, діями в надзвичайних ситуаціях та порядком використання ЗІЗ. Важливо, щоб працівники розуміли свої права та обов'язки у сфері охорони праці, а також знали, до кого звернутися в разі виникнення питань або проблем.

Відповідальність за дотримання вимог охорони праці покладається як на роботодавця, так і на працівників. Роботодавець зобов'язаний створити умови праці, які відповідають нормативним актам з охорони праці, організувати проведення медичних оглядів, забезпечити належний стан обладнання та виробничих приміщень.

Працівники, у свою чергу, повинні дотримуватися правил внутрішнього трудового розпорядку, використовувати надані ЗІЗ, негайно повідомляти про будь-які небезпечні ситуації чи несправності. Систематичний контроль за дотриманням норм охорони праці, проведення перевірок та аудитів допомагають виявляти та усувати потенційні загрози, забезпечуючи постійне підвищення рівня безпеки на робочих місцях.

ВИСНОВКИ

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є однією з провідних технологій сучасного екологічного моніторингу. Вона дозволяє регулярно та з високою точністю отримувати масштабовану просторово-часову інформацію про стан наземних екосистем.

Систематичне використання супутникових даних (оптичних, радарних (SAR), мультиспектральних) та вегетаційних індексів дає змогу комплексно оцінювати структурні, динамічні й функціональні характеристики екосистем. Це включає аналіз рослинності, властивостей ґрунту, змін, спричинених кліматом чи бойовими діями, а також рівень антропогенного навантаження.

Оптичні дані надають детальні візуальні характеристики рослинного покриву, але, як вже згадувалося, мають обмеження через хмарність. Мультиспектральна зйомка, завдяки чутливості до біохімічних та фізіологічних процесів у рослинах, забезпечує якісний моніторинг динаміки вегетації, стресових станів та продуктивності. Радіолокаційні (SAR) дані, своєю чергою, доповнюють оптичні джерела, оскільки дозволяють отримувати інформацію незалежно від погодних умов.

Інтегроване використання вегетаційних індексів, характерних ознак рослинності та різних типів супутникових даних у поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС), інструментами штучного інтелекту (ШІ) та польовими вимірюваннями значно підвищує точність оцінки стану екосистем. Це також розширює спектр прикладних завдань: від аналізу агроекосистем до глобального моніторингу лісів, пасовищ, деградованих земель і природних заповідників.

Такі підходи є основою для розробки ефективних стратегій сталого природокористування, адаптації до змін клімату та прийняття рішень у сфері агрономії та охорони довкілля на локальному, регіональному та глобальному рівнях.

Отже, дистанційне зондування Землі — це потужний міждисциплінарний інструмент, що забезпечує науково обґрунтовану, оперативну та просторово експліцитну основу для комплексного аналізу, прогнозування та управління станом наземних екосистем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] «Формування Науково-Методичних Зasad Супутникового Агроекологічного Моніторингу В Україні» О.Г. Тараріко, Т.В. Ільєнко, Т.Л. Кучма, Н.І. Адамчук-Чала, О.А. Білокінь
- [2] Аерокосмічний Моніторинг Опустелювання Та Деградації Земель» О.Г. Тараріко, О.В. Сиротенко, Т.Л. Кучма, Т.В. Ільєнко
- [3] «Моніторинг Процесів Опустелювання Агроекосистем За Супутниковими Даними: Досвід Та Перспективи» Д.П. Васільєв, Т.В. Ільєнко
- [4] «Ерозія Ґрунтів Як Чинник Опустелювання Агроландшафтів України» О.Г. Тараріко, Т.В. Ільєнко, Т.Л. Кучма, О.А. Білокінь
- [5] [Online] <https://superagronom.com/news/17826-metodi-viznachennya-ndvi--nazvano-perevagi-ta-nedoliki>
- [6] [Online] <https://geoawesome.com/eo-hub/understanding-aerial-data-normalized-difference-vegetation-index-ndvi/>
- [7] [Online] <https://www.soft.farm/uk/blog/vegetacijni-indeksi-ndvi-evi-gndvi-cvi-true-color-140>
- [8] [Online] https://www.agroeco.org.ua/wp-content/uploads/Publications/metod_recomendatsii/Monitoring%20transformazii%20agrolandshaftiv.pdf
- [9] [Online] <https://space4water.org/taxonomy/term/1242>
- [10] [Online] <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/savi.htm>
- [11] [Online] <https://eos.com/uk/blog/vehetatsiini-indeksy/>
- [12] [Online] https://www.researchgate.net/figure/Mapping-of-locust-infestation-for-casting-using-soil-moisture-data-from-the-SMOS_fig4_342339858
- [13] [Online] https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-1/soil_moisture_estimation/