

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики

(навчально-науковий інститут)

факультет інформаційних технологій

(факультет)

Кафедра інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

(повна назва)

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

(бакалавра, магістра)

Здобувача вищої освіти Мітенков Данило Олегович

(ПІБ)

академічної групи 126-213-1

(шифр)

спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

(код і назва спеціальності)

спеціалізації за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

(за наявності)

Інформаційні системи та технології

(офіційна назва)

на тему Інформаційна система оцінки впливу посух на стан

сільськогосподарських культур за даними дистанційного зондування Землі

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	доц. Сергєєва К.Л.			
розділів:	доц. Сергєєва К.Л.			
Аналіз стану області рішення завдання	доц. Сергєєва К.Л.			
Проектні рішення	доц. Сергєєва К.Л.			
Рецензент				
Нормоконтролер	проф. Коротенко Г.М.			

Дніпро  
2025

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ В.В. Гнатушенко  
(підпис) (ініціали та прізвище)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

## ЗАВДАННЯ

### на кваліфікаційну роботу ступеня бакалавра

(бакалавра, магістра)

здобувача вищої освіти Мітенков Д.О. академічної групи 126-213-1  
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

за освітньою-професійною програмою «Інформаційні системи та технології»

на тему Інформаційна система оцінки впливу посух на стан

сільськогосподарських культур за даними дистанційного зондування Землі

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 05.05.2025 № 337-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1. Аналіз стану області рішення завдання	Літературний огляд, огляд існуючих аналогів, математичних моделей, методів, алгоритмів та технологій для формування задач виконання завдання, планування етапів розробки та проєктних рішень.	01.03.2025 31.03.2025
Розділ 2. Проєктні рішення	1. Провести огляд літературних джерел з проблеми моніторингу посух та використання даних ДЗЗ. 2. Виконати аналіз та відбір даних Sentinel-2 для експериментального поля кукурудзи в Дніпропетровській області за липень 2019-2024 рр. 3. Реалізувати розрахунок спектральних індексів (NDVI, STR, EVI, NDWI, NMDI) за відібраними супутниковими даними. 4. Реалізувати алгоритм моделі OPTRAM, включаючи визначення параметрів "сухого" та "мокрого" країв трапеції STR-NDVI. 5. Розрахувати карти та часові ряди індексу вологості SMI_OPTRAM для досліджуваної території та періоду. 6. Розробити архітектуру та програмні компоненти інформаційної системи для автоматизації обробки даних, розрахунку індексів та візуалізації результатів оцінки впливу посухи. 7. Проаналізувати отримані результати (карти та часові ряди індексів), оцінити їх відповідність відомим посушливим періодам та стану посівів.	04.03.2025 12.06.2025

**Завдання видано** \_\_\_\_\_  
(підпис керівника) (ініціали та прізвище)

Дата видачі \_\_\_\_\_

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_ Мітенков Д.О.  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 93 с., 34 рис., 1 табл., 12 джерел, 3 додатки.

**Об’єкт дослідження** – процеси оцінки стану сільськогосподарських культур під впливом посушливих явищ з використанням даних дистанційного зондування Землі.

**Предмет дослідження** – методи та алгоритми обробки супутникових знімків Sentinel-2 для розрахунку спектральних індексів та індексу вологості на основі моделі OPTRAM для моніторингу посухи на посівах кукурудзи.

**Мета роботи** – розробка інформаційної системи для оцінки впливу посух на стан посівів кукурудзи на експериментальному полі в Дніпропетровській області за період 2019-2024 рр. шляхом аналізу часових рядів спектральних індексів (NDVI, EVI, NDWI, NMDI, STR) та індексу вологості SMI\_OPTRAM, отриманих з даних супутника Sentinel-2.

У роботі проведено огляд літературних джерел з проблеми моніторингу посух та використання даних ДЗЗ. Проаналізовано характеристики супутникових даних Sentinel-2 та їх потенціал для агромоніторингу. Детально розглянуто принципи розрахунку ключових спектральних індексів та модель OPTRAM. Розроблено архітектуру та програмні компоненти інформаційної системи мовою Python для автоматизованої обробки супутникових даних, розрахунку вказаних індексів, включаючи SMI\_OPTRAM, та генерації карт і часових рядів середніх значень для досліджуваної території. Проведено розрахунки для експериментального поля кукурудзи в Дніпропетровській області за липневі періоди 2019-2024 рр. Здійснено аналіз отриманих результатів, включаючи візуальну оцінку карт та кількісний аналіз часових рядів індексів, для виявлення міжрічної мінливості умов зволоження та стану рослинності.

Результати роботи можуть бути використані для оперативного моніторингу стану сільськогосподарських культур, раннього виявлення ознак водного стресу

та прийняття обґрунтованих управлінських рішень в агровиробництві.

ПОСУХА, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ, SENTINEL-2, КУКУРУДЗА, СПЕКТРАЛЬНІ ІНДЕКСИ, NDVI, EVI, NDWI, NMDI, STR, МОДЕЛЬ ОРТРАМ, SMI, ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ, ЧАСОВІ РЯДИ.

## ABSTRACT

Explanatory note: 93 pp., 34 figs., 1 tables, 12 references, 3 appendices.

**The object of research** – processes of assessing the state of agricultural crops under the influence of drought phenomena using remote sensing data.

**The subject of research** – methods and algorithms for processing Sentinel-2 satellite images to calculate spectral indices and a moisture index based on the OPTRAM model for drought monitoring on corn crops.

**The aim of the work** – development of an information system for assessing the impact of droughts on the state of corn crops on an experimental field in the Dnipropetrovsk region for the period 2019-2024 by analyzing time series of spectral indices (NDVI, EVI, NDWI, NMDI, STR) and the SMI\_OPTRAM moisture index, derived from Sentinel-2 satellite data.

The work provides a literature review on the problem of drought monitoring and the use of remote sensing data. The characteristics of Sentinel-2 satellite data and their potential for agromonitoring are analyzed. The principles of calculating key spectral indices and the OPTRAM model are detailed. The architecture and software components of an information system developed in Python for automated processing of satellite data, calculation of the specified indices, including SMI\_OPTRAM, and generation of maps and time series of average values for the study area are described. Calculations were performed for an experimental corn field in the Dnipropetrovsk region for the July periods of 2019-2024. An analysis of the obtained results was carried out, including visual assessment of maps and quantitative analysis of index time series, to identify interannual variability in moisture conditions and vegetation state.

The results of the work can be used for operational monitoring of the state of agricultural crops, early detection of water stress signs, and making informed

management decisions in agricultural production.

DROUGHT, REMOTE SENSING, SENTINEL-2, CORN, SPECTRAL INDICES,  
NDVI, EVI, NDWI, NMDI, STR, OPTRAM MODEL, SMI, INFORMATION  
SYSTEM, MONITORING, TIME SERIES.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДЗЗ – Дистанційне зондування Землі

ОПП – Освітньо-професійна програма

КР – Кваліфікаційна робота

НТУ – Національний технічний університет

ЕК – Екзаменаційна комісія

ПЗ – Програмне забезпечення

ІТ – Інформаційні технології

NDVI – Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index)

EVI – Покращений вегетаційний індекс (Enhanced Vegetation Index)

NDWI – Нормалізований різницевий водний індекс (Normalized Difference Water Index)

NMDI – Нормалізований багатоканальний індекс посухи (Normalized Multi-band Drought Index)

STR – Трансформоване відбиття у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (Shortwave Infrared Transformed Reflectance)

LST – Температура поверхні землі (Land Surface Temperature)

SMI – Індекс вологості ґрунту (Soil Moisture Index)

OPTRAM – Оптична трапецоїдна модель (OPTical TRApEZoid Model)

TOTRAM – Термо-оптична трапецоїдна модель (Thermal-Optical TRApEZoid Model)

SWIR – Короткохвильовий інфрачервоний діапазон (Shortwave Infrared)

NIR – Близький інфрачервоний діапазон (Near Infrared)

RGB – Колірна модель Red, Green, Blue (Червоний, Зелений, Синій)

API – Інтерфейс прикладного програмування (Application Programming Interface)

CSV – Значення, розділені комою (Comma-Separated Values)

GeoTIFF – Геопросторовий формат файлів зображень на основі TIFF (Geospatial Tagged Image File Format)

GIS / ГІС – Географічна інформаційна система (Geographic Information System)

UML – Уніфікована мова моделювання (Unified Modeling Language)

CRS – Система координат (Coordinate Reference System)

EPSG – Набір параметрів геодезичних даних Європейської нафтогазової розвідувальної групи (European Petroleum Survey Group)

UTM – Універсальна поперечна проекція Меркатора (Universal Transverse Mercator)

AOI – Територія інтересу (Area of Interest)

DN – Цифрове значення (Digital Number)

L2A – Рівень обробки 2A (атмосферно скориговане відбиття поверхні)

## ВСТУП

Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки України, проте воно значною мірою залежить від кліматичних умов. Одним із найбільш руйнівних природних явищ, що негативно впливає на врожайність сільськогосподарських культур, є посуха. Зміна клімату, що проявляється у підвищенні середньорічних температур та зміні режиму випадіння опадів, лише посилює цю проблему, роблячи посухи частішими та інтенсивнішими, зокрема в степовій зоні України, до якої належить Дніпропетровська область.

Кукурудза, будучи важливою зерною та кормовою культурою, є досить вимогливою до вологи, особливо в критичні фази свого розвитку. Нестача вологи в ці періоди може призвести до значного (до 50% і більше) зниження врожайності, погіршення якості зерна та фінансових збитків для агровиробників. Тому розробка ефективних методів моніторингу стану посівів кукурудзи та раннього виявлення ознак водного стресу є надзвичайно актуальною задачею для сталого розвитку агросектору.

Традиційні методи оцінки посухи, що базуються на даних метеостанцій та наземних вимірюваннях, мають суттєвий недолік – низьку просторову репрезентативність. Технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) долають це обмеження, надаючи можливість отримувати синоптичну, регулярну та просторово розподілену інформацію про стан земної поверхні. Супутникові дані, зокрема з супутників серії Sentinel-2 Європейського космічного агентства (ESA) в рамках програми Copernicus, надають унікальні можливості для детального моніторингу сільськогосподарських культур завдяки високій просторовій (10-20 м), часовій (5 днів з двома супутниками) та багатому спектральному діапазону.

Для кількісної оцінки стану рослинності та умов її зволоження використовуються різноманітні спектральні індекси. Трапецоїдні моделі, такі як TOTRAM та OPTRAM, дозволяють інтегрувати інформацію про стан рослинності (зазвичай через NDVI) та умови зволоження (через температуру поверхні LST або трансформоване відбиття у SWIR-діапазоні STR) для отримання відносного індексу вологості. Модель OPTRAM, на відміну від

TOTRAM, не потребує теплових даних, що робить її особливо придатною для використання з даними Sentinel-2, які не мають власного теплового каналу високої роздільної здатності.

**Актуальність теми** кваліфікаційної роботи полягає у потребі розробки спеціалізованої інформаційної системи, яка б використовувала переваги даних Sentinel-2 та моделі OPTRAM для оперативного моніторингу впливу посухи на посіви кукурудзи на регіональному/локальному рівні, зокрема для умов Дніпропетровської області. Така система може надати цінний інструмент для агровиробників та управлінців для більш точної та своєчасної оцінки ризиків, пов'язаних із посухою, та прийняття адаптивних рішень.

**Метою кваліфікаційної роботи** є розробка інформаційної системи для оцінки впливу посух на стан посівів кукурудзи на експериментальному полі в Дніпропетровській області за період 2019-2024 рр. шляхом аналізу часових рядів спектральних індексів (NDVI, EVI, NDWI, NMDI, STR) та індексу вологості SMI\_OPTRAM, отриманих з даних супутника Sentinel-2.

**Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:**

1. Провести огляд літературних джерел з проблеми моніторингу посух та використання даних ДЗЗ, проаналізувати існуючі підходи та інформаційні системи.
2. Виконати аналіз та відбір супутникових даних Sentinel-2 для експериментального поля кукурудзи в Дніпропетровській області за липневі періоди 2019-2024 рр.
3. Реалізувати програмні засоби для розрахунку необхідних спектральних індексів (NDVI, STR, EVI, NDWI, NMDI) за відібраними супутниковими даними.
4. Реалізувати алгоритм моделі OPTRAM, включаючи визначення параметрів "сухого" та "мокрого" країв трапеції STR-NDVI.
5. Розрахувати карти та часові ряди індексу вологості SMI\_OPTRAM для досліджуваної території та періоду.
6. Розробити архітектуру та основні програмні компоненти інформаційної

системи для автоматизації процесу обробки даних, розрахунку індексів та візуалізації результатів оцінки впливу посухи.

7. Проаналізувати отримані результати (карти та часові ряди індексів), оцінити їх відповідність відомим посушливим періодам та стану посівів.

**Об'єктом дослідження** є процеси оцінки стану сільськогосподарських культур (кукурудзи) під впливом посушливих явищ з використанням даних ДЗЗ.

**Предметом дослідження** є методи та алгоритми обробки супутникових знімків Sentinel-2 для розрахунку спектральних індексів та індексу вологості на основі моделі OPTRAM для моніторингу посухи.

**Наукова новизна** роботи полягає в адаптації та застосуванні моделі OPTRAM для умов вирощування кукурудзи в степовій зоні України на основі даних Sentinel-2, а також у розробці прототипу інформаційної системи, що автоматизує цей процес.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у можливості створення інструменту для оперативного моніторингу посух, що може сприяти підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва та зменшенню втрат від несприятливих погодних умов.

**Апробація результатів.** Основні результати роботи були представлені на засіданні кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка» (протокол \_\_\_\_\_)

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить XX сторінок, включаючи YY рисунків, ZZ таблиць. Список використаних джерел налічує NN найменувань.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СТАНУ ОБЛАСТІ РІШЕННЯ ЗАВДАННЯ

В розділі представлений огляд літературних джерел та сучасного стану проблеми моніторингу впливу посух на стан сільськогосподарських культур. Розглянуто основні виклики, пов'язані з посухою, її типи та економічні наслідки для агросектору, зокрема для вирощування кукурудзи в умовах Дніпропетровської області. Проаналізовано можливості використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), детально розглянуто характеристики та потенціал даних супутника Sentinel-2. Висвітлено принципи використання спектральних індексів (NDVI, EVI, NDWI, NMDI, STR, Red Edge індекси) та трапецоїдних моделей (TOTRAM, OPTRAM) як інструментів для кількісної оцінки водного стресу та стану рослинності. Проаналізовано переваги та недоліки різних підходів, обґрунтовано вибір моделі OPTRAM для використання з даними Sentinel-2. Проведено огляд існуючих інформаційних систем моніторингу посух та визначено місце запропонованої системи. На основі аналізу сформульовано основні завдання кваліфікаційної роботи.

#### 1.1 Огляд літературних джерел

##### 1.1.1 Проблема посухи та її вплив на сільське господарство

Посуха є одним з найбільш складних та економічно збиткових природних явищ, що впливають на агроecosистеми в усьому світі. Вона визначається як тривалий період із значним дефіцитом опадів порівняно з середніми кліматичними показниками, що призводить до зниження запасів вологи в ґрунті, поверхневих та підземних водах, і, як наслідок, до порушення гідрологічного балансу та виникнення водного стресу у рослин [1]. Залежно від основних індикаторів та наслідків, розрізняють декілька типів посух:

- **Метеорологічна посуха:** Визначається дефіцитом опадів протягом

певного періоду.

- **Сільськогосподарська посуха:** Характеризується нестачею вологи у кореневмісному шарі ґрунту, що призводить до стресу сільськогосподарських культур та зниження їх продуктивності. Саме цей тип посухи є основним фокусом даної роботи.
- **Гідрологічна посуха:** Проявляється у зниженні рівня поверхневих (річки, озера) та підземних вод.
- **Соціально-економічна посуха:** Виникає, коли дефіцит води починає впливати на соціальні та економічні системи (нестача питної води, проблеми з енергетикою, продовольча безпека).

Всі типи посух взаємопов'язані, часто метеорологічна посуха призводить до сільськогосподарської, а потім і до гідрологічної.

Україна, зокрема її степова зона, до якої належить Дніпропетровська область, є регіоном із високим ризиком виникнення посух. Зміна клімату, що проявляється у підвищенні середньорічних температур та зміні режиму випадіння опадів (збільшення періодів без дощів, зростання інтенсивності злив), лише посилює цю проблему.

Кукурудза, будучи однією з ключових зернових та кормових культур, є досить вимогливою до вологи, особливо у критичні фази розвитку (викидання волоті, цвітіння, налив зерна). Нестача вологи в ці періоди може призвести до значного (до 50% і більше) зниження врожайності, погіршення якості зерна, фінансових збитків для фермерів та негативного впливу на продовольчу безпеку. Тому розробка ефективних методів моніторингу стану посівів кукурудзи та раннього виявлення ознак водного стресу є надзвичайно важливою задачею для сталого розвитку агросектору. Своєчасна інформація про розвиток посухи дозволяє аграріям приймати адаптивні управлінські рішення, такі як оптимізація поливу (де це можливо), коригування норм внесення добрив, вибір більш посухостійких гібридів, планування збирання врожаю та страхування ризиків.

### 1.1.2 Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) як інструмент моніторингу посух

Традиційні методи оцінки посухи базуються на даних метеорологічних станцій (опаді, температура) та наземних вимірюваннях вологості ґрунту. Ці методи надають точні дані, але мають суттєвий недолік – низьку просторову репрезентативність. Інформація отримується лише для конкретних точок, а умови на полі можуть значно варіювати.

Технології ДЗЗ долають це обмеження, надаючи можливість отримувати синоптичну, регулярну та просторово розподілену інформацію про стан земної поверхні. Супутники оснащені сенсорами, які реєструють електромагнітне випромінювання, відбите (в оптичному діапазоні) або випромінене (в тепловому діапазоні) землею поверхнею, а також дані радарних систем (мікрохвильовий діапазон).

Принцип використання ДЗЗ для моніторингу посух базується на тому, що фізіологічний стан рослинності та фізичні характеристики ґрунту тісно пов'язані з умовами зволоження і впливають на їх взаємодію з електромагнітним випромінюванням 1:

- **Стан рослинності:** Водний стрес викликає зміни в рослинах: зменшення вмісту води в листі, зниження вмісту хлорофілу, зміна структури листя та архітектури посіву, закриття продихів, зниження фотосинтетичної активності та біомаси. Ці зміни призводять до зміни спектральної відбивної здатності, особливо у видимому, ближньому інфрачервоному (NIR), червоному крайовому (Red Edge) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах.
- **Стан ґрунту:** Вологість ґрунту впливає на його відбивну здатність (вологий ґрунт темніший за сухий) та температуру поверхні (вологий ґрунт холодніший через випаровування).

Аналізуючи ці зміни за допомогою супутникових даних, можна опосередковано оцінювати рівень водного стресу та розвиток посухи.

### 1.1.3 Супутникові дані Sentinel-2 та їх потенціал

Програма Copernicus ЄС забезпечує вільний доступ до даних супутників Sentinel, які є передовими інструментами для спостереження Землі. Для задач агромоніторингу та оцінки посух особливу цінність мають дані мультиспектральних сенсорів MSI (Multi-Spectral Instrument) на борту супутників-близнюків Sentinel-2A та Sentinel-2B. Як детально аналізується в 1, їх ключові переваги:

- **Висока просторова роздільна здатність:** 10 м для синього (B2), зеленого (B3), червоного (B4) та NIR (B8) каналів; 20 м для каналів Red Edge (B5, B6, B7, B8a) та SWIR (B11, B12); 60 м для атмосферних каналів (B1, B9, B10). Така роздільна здатність є оптимальною для аналізу стану посівів на рівні окремих полів та виявлення внутрішньопольової неоднорідності.
- **Висока часова роздільна здатність:** Завдяки наявності двох супутників, час повторного прольоту над екватором становить 5 днів (і ще менше для середніх широт), що дозволяє оперативно відстежувати швидкі зміни у стані рослинності під час вегетаційного періоду та розвитку посухи.
- **Багатий спектральний діапазон:** 13 каналів, що покривають видимий, NIR, Red Edge та SWIR діапазони. Особливо важливими є:
  - **Канали "червоного краю" (Red Edge, ~700-780 нм):** Ця область спектру є перехідною між сильним поглинанням хлорофілом у червоному діапазоні та високим відбиттям у NIR. Відбиття тут дуже чутливе до вмісту хлорофілу, азоту та фізіологічного стану рослин. Зміни в Red Edge каналах часто випереджають зміни у стандартному NDVI при виникненні стресу.
  - **Канали SWIR (~1600 нм та ~2200 нм):** Сильно поглинаються

водою. Використовуються для оцінки вмісту води в листі та ґрунті, а також є основою для моделі OPTRAM.

Ці унікальні характеристики роблять Sentinel-2 одним з найпотужніших інструментів для детального моніторингу сільськогосподарських культур та оцінки впливу посухи на них. Стандартним продуктом для аналізу є дані рівня L2A, які вже пройшли атмосферну корекцію і містять значення поверхневого відбиття. Спектральні індекси для оцінки стану рослинності та умов зволоження.

Спектральні індекси дозволяють перетворити багатоканальну супутникову інформацію в єдиний показник, який підсилює певну характеристику поверхні та нівелює вплив інших факторів (наприклад, освітлення). Для оцінки посухи використовуються різні групи індексів:

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):** Класичний індекс для оцінки зеленої біомаси та фотосинтетичної активності. Формула:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Де NIR = 760-900 нм, відбивна інфрачервона область спектра;

Red = 630-690 нм, відбивна червона область спектра.

- *Принцип:* Використовує високе відбиття здорової рослинності в NIR та сильне поглинання хлорофілом у червоному діапазоні.
  - *Обмеження:* Може "насичуватись" при високій густоті покриття, чутливий до фону ґрунту при низькій густоті.
- **EVI (Enhanced Vegetation Index):** Покращена версія NDVI, що намагається подолати його обмеження. Формула:

$$EVI = 2,5 * \left( \frac{NIR - Red}{NIR + 6 * Red - 7,5 * Blue + 1} \right)$$

- *Принцип:* Включає синій канал для кращої атмосферної корекції та коефіцієнти для зменшення впливу ґрунту та насичення.
  - *Переваги:* Краща чутливість у густій рослинності.
- **NDWI (Normalized Difference Water Index - версія для вологи в**

**рослинності):** Індекс для оцінки вмісту води в листі. Формула:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

- **NMDI (Normalized Multi-band Drought Index):** Комплексний індекс посухи. Формула:

$$NMDI = \frac{NIR - (SWIR1 - SWIR2)}{NIR + (SWIR1 - SWIR2)}$$

- *Принцип:* Враховує як відбиття в NIR (стан біомаси), так і різницю між двома SWIR каналами, яка чутлива до вмісту води.
- **STR (Shortwave Infrared Transformed Reflectance):** Показник для моделі OPTRAM. Формула:

$$STR = \frac{(1 - RSWIR)^2}{(2 * RSWIR)}$$

- *Принцип:* Має теоретично лінійний зв'язок з вологістю поверхні.
- **Індекси "червоного краю":** Наприклад, NDVI<sub>re</sub> (використовує один з Red Edge каналів замість Red) або CI<sub>re</sub> (Chlorophyll Index Red Edge).
  - *Приклад (NDVI<sub>re1</sub>):*  $NDVI_{re1} = (B7 - B5) / (B7 + B5)$
  - *Принцип:* Висока чутливість до вмісту хлорофілу та стресу, що впливає на форму спектральної кривої в цій області.

Аналіз динаміки комбінації цих індексів у часі дозволяє отримати більш повну картину реакції посівів кукурудзи на посушливі умови. Наприклад, перші ознаки стресу можуть з'явитися в індексах червоного краю або водних індексах, і лише потім відобразитись у зниженні NDVI/EVI.

#### 1.1.4 Трапецоїдні моделі оцінки вологості: TOTRAM та OPTRAM

Для кількісної оцінки умов зволоження поверхні та стану рослинності за

даними дистанційного зондування широко застосовуються так звані трапецоїдні (або трикутні) моделі. Ці моделі базуються на аналізі взаємозв'язку між індексом вегетації (VI), що характеризує щільність та стан рослинного покриву, та показником, чутливим до вмісту вологи або температури поверхні. У просторі цих двох показників дані для різноманітних типів поверхні зазвичай утворюють фігуру, що нагадує трапецію або трикутник, межі якої відповідають екстремальним умовам зволоження.

Історично однією з перших і найбільш відомих є **термо-оптична трапецоїдна модель (TOTRAM – Thermal-Optical TRapezoid Model)**. Вона використовує температуру поверхні землі (LST), отриману з теплових каналів супутникових знімків, як індикатор вологості, та індекс вегетації, найчастіше NDVI, для характеристики рослинного покриву.

**Фізична основа TOTRAM:** Модель ґрунтується на тому, що при однакових умовах сонячного опромінення та однаковому вегетаційному покриві (однаковий NDVI), поверхні з більшим вмістом вологи будуть холоднішими через витрати енергії на випаровування (евапотранспірацію). Відповідно, тепліші поверхні вказують на дефіцит вологи.

**Простір LST-NDVI:** У цьому просторі:

- **"Сухий край" (dry edge):** Лінія, що з'єднує точки з максимальною температурою для кожного значення NDVI. Вона відповідає умовам, де випаровування мінімальне через сильний дефіцит вологи.
- **"Мокрий край" (wet edge):** Лінія, що з'єднує точки з мінімальною температурою для кожного значення NDVI. Вона відповідає умовам, де випаровування максимальне і не обмежується наявністю вологи (потенційна евапотранспірація).
- **Індекс вологості (наприклад, TVDI – Temperature Vegetation Dryness Index, або нормалізований SMI):** Розраховується на основі відносного положення конкретного пікселя між сухим та мокрим краями для його значення NDVI. Зазвичай, значення нормалізуються до діапазону 0-1, де 0 відповідає мокрому краю, а 1 – сухому (або навпаки, залежно від формули).

- **Недоліки TOTRAM для даних Sentinel-2:** Основною проблемою застосування TOTRAM з даними Sentinel-2 є відсутність у супутників Sentinel-2A/B власних теплових каналів для отримання LST з високою просторовою роздільною здатністю, сумісною з оптичними каналами (10-20м). Використання LST з інших джерел (Landsat, MODIS) ускладнюється різницею в роздільній здатності та часі зйомки. Окрім того, LST сильно залежить від миттєвих погодних умов, що вимагає параметризації моделі для кожної окремої сцени, а також модель може некоректно працювати в енерго-лімітованих умовах, де низька температура не завжди означає високу вологість [Burdun et al., 2020].

З огляду на обмеження TOTRAM, для роботи з оптичними даними Sentinel-2 була запропонована та розвинена **оптична трапецоїдна модель (OPTRAM – Optical TRapezoid Model)**. Ця модель також використовує індекс вегетації (зазвичай NDVI), але замість LST як індикатор вологості застосовує трансформоване відбиття у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (STR).

**Фізична основа OPTRAM:** Модель базується на властивості води сильно поглинати випромінювання у SWIR-діапазоні (канали Sentinel-2 B11 ~1610 нм та B12 ~2190 нм). Чим більше води міститься в ґрунті або рослинності, тим сильніше поглинання і, відповідно, нижче відбиття у SWIR. Для зручності інтерпретації та лінеаризації зв'язку з вологістю, використовується трансформація:

$$STR = \frac{(1 - R_{SWIR})^2}{(2 * R_{SWIR})}$$

де  $R_{SWIR}$  – коефіцієнт відбиття в одному з SWIR каналів (у даній роботі використовується канал B12). При такій трансформації високі значення STR відповідають вологим умовам (низьке  $R_{SWIR}$ ), а низькі значення STR – сухим умовам (високе  $R_{SWIR}$ ).

**Простір STR-NDVI:**

**"Сухий край" (dry edge):** Лінія, що з'єднує точки з мінімальними значеннями STR для кожного значення NDVI.

**"Мокрий край" (wet edge):** Лінія, що з'єднує точки з максимальними значеннями STR для кожного значення NDVI (або може включати "перезволожений край" – oversaturated edge, якщо присутні ділянки з відкритою водою або дуже насиченим ґрунтом).

**Індекс вологості SMI\_OPTRAM:** Розраховується аналогічно до TOTRAM, як відносне положення пікселя між сухим та мокрим краями:

$$SMI\_OPTRAM = \frac{STR_{\text{пікселя}} - STR_{\text{сухого_краю}}}{STR_{\text{мокрого_краю}} - STR_{\text{сухого_краю}}}$$

Значення 0 відповідає сухому краю, 1 – мокрому.

### **Переваги OPTRAM для Sentinel-2:**

Використовує лише оптичні канали, наявні на Sentinel-2 з високою просторовою роздільною здатністю.

STR менш чутливий до миттєвих атмосферних умов порівняно з LST, що створює потенціал для розробки більш універсальної параметризації країв для конкретної місцевості та типу рослинності [2].

Обмеження OPTRAM: Чутливість до типу рослинності та структури покриву, вплив тіней та відкритої води, які можуть давати аномальні значення STR [2].

Враховуючи доступність необхідних каналів на Sentinel-2 та меншу залежність від важкодоступних теплових даних, модель OPTRAM була обрана як основна для розробки інформаційної системи оцінки посухи в даній кваліфікаційній роботі.

## **1.1.5 Трапецоїдні моделі оцінки вологості: TOTRAM та OPTRAM**

Для кількісної оцінки умов зволоження поверхні та стану рослинності за даними дистанційного зондування широко застосовуються так звані трапецоїдні (або трикутні) моделі. Ці моделі базуються на аналізі взаємозв'язку між індексом вегетації (VI), що характеризує щільність та стан рослинного покриву, та показником, чутливим до вмісту вологи або температури поверхні. У просторі цих двох показників дані для різноманітних типів поверхні зазвичай

утворюють фігуру, що нагадує трапецію або трикутник, межі якої відповідають екстремальним умовам зволоження.

Історично однією з перших і найбільш відомих є **термо-оптична трапецоїдна модель (TOTRAM – Thermal-Optical TRAppezoid Model)**. Вона використовує температуру поверхні землі (LST), отриману з теплових каналів супутникових знімків, як індикатор вологості, та індекс вегетації, найчастіше NDVI, для характеристики рослинного покриву.

- **Фізична основа TOTRAM:** Модель ґрунтується на аналізі енергетичного балансу поверхні. При однакових умовах сонячного опромінення та однаковому вегетаційному покриві (однаковий NDVI), поверхні з більшим вмістом води будуть холоднішими через витрати енергії на випаровування (евапотранспірацію). Цей процес охолодження, відомий як перетворення прихованого тепла (latent heat flux), є домінуючим компонентом енергетичного балансу для вологих поверхонь. Навпаки, для сухих поверхонь, де вода для випаровування відсутня, сонячна енергія переважно йде на нагрів поверхні (потік явного тепла, sensible heat flux), що призводить до значного підвищення LST. Відповідно, тепліші поверхні вказують на дефіцит води.
- **Простір LST-NDVI:** У цьому двовимірному просторі формуються характерні межі:
  - **"Сухий край" (dry edge):** Це верхня межа трапеції, що з'єднує точки з максимальною температурою для кожного значення NDVI. Вона відповідає умовам, де випаровування мінімальне через сильний дефіцит води (water-limited conditions).
  - **"Мокрий край" (wet edge):** Це нижня межа трапеції, що з'єднує точки з мінімальною температурою для кожного значення NDVI. Вона відповідає умовам, де випаровування максимальне і не обмежується наявністю води (energy-limited conditions), тобто дорівнює потенційній евапотранспірації.
- **Індекс вологості (наприклад, TVDI – Temperature Vegetation Dryness Index, або нормалізований SMI):** Розраховується на основі відносного положення конкретного пікселя між сухим та мокрим краями для його

значення NDVI. Зазвичай, значення нормалізуються до діапазону 0-1, де 0 відповідає мокрому краю, а 1 – сухому (або навпаки, залежно від формули).

- **Недоліки TOTRAM для даних Sentinel-2:** Основною проблемою застосування TOTRAM з даними Sentinel-2 є відсутність у супутників Sentinel-2A/B власних теплових сенсорів для прямого вимірювання LST з високою просторовою роздільною здатністю, яка відповідала б його оптичним каналам (10-20 метрів). Хоча LST можна отримати з інших супутників (наприклад, Landsat 8/9, MODIS, Sentinel-3 SLSTR), це створює суттєві проблеми:
  - **Просторова розбіжність:** LST з інших джерел часто має значно грубшу роздільну здатність (наприклад, 100м для Landsat, 1км для MODIS/Sentinel-3), що робить неточним її поєднання з 10/20-метровими оптичними даними Sentinel-2.
  - **Часова розбіжність:** Супутники пролітають у різний час, що може призвести до значних розбіжностей між оптичними даними та LST через добовий хід температури.
  - **Залежність від метеоумов:** LST сильно залежить від поточних погодних умов (температура повітря, сонячна радіація, швидкість вітру, вологість повітря) на момент зйомки. Це означає, що параметри "сухого" та "морого" країв у моделі TOTRAM потрібно визначати для кожної окремої сцени (дати зйомки), що робить модель менш універсальною та більш трудомісткою в застосуванні для довгострокового моніторингу.
  - **Обмеження в енерго-лімітованих зонах:** Модель може некоректно працювати в умовах, де низька температура не завжди означає високу вологість, наприклад, у високих широтах або в холодну пору року [Burdun et al., 2020].

З огляду на обмеження TOTRAM, для роботи з оптичними даними Sentinel-2 була запропонована та розвинена **оптична трапеційдна модель (OPTRAM – Optical TRAppezoid Model)** [2]. Ця модель також використовує індекс вегетації (зазвичай NDVI), але замість LST як індикатор вологості застосовує

трансформоване відбиття у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (STR).

- **Фізична основа OPTRAM:** Модель базується на фундаментальній властивості води сильно поглинати випромінювання у SWIR-діапазоні (канали Sentinel-2 B11 ~1610 нм та B12 ~2190 нм). Чим більше води міститься в ґрунті або рослинності, тим сильніше поглинання і, відповідно, нижчим буде коефіцієнт відбиття ( $R_{SWIR}$ ) у цьому діапазоні. Для лінеаризації цього зв'язку з вологістю та зручності інтерпретації, використовується математична трансформація:

$$STR = \frac{(1 - R_{SWIR})^2}{2 * R_{SWIR}}$$

При такій трансформації виникає обернений зв'язок: **високі значення STR відповідають вологим умовам** (оскільки  $R_{SWIR}$  низьке), а **низькі значення STR – сухим умовам** (оскільки  $R_{SWIR}$  високе).

- **Простір STR-NDVI:**
  - **"Сухий край" (dry edge):** Це лінія, що з'єднує точки з мінімальними значеннями STR для кожного значення NDVI. Вона відповідає найсухішим умовам.
  - **"Мокрий край" (wet edge):** Це лінія, що з'єднує точки з максимальними значеннями STR для кожного значення NDVI. Вона відповідає найвологішим умовам, близьким до насичення. Може також включати "перезволожений край" (oversaturated edge), якщо присутні ділянки з відкритою водою.
- **Індекс вологості SMI\_OPTRAM:** Розраховується аналогічно до TOTRAM, як відносне положення пікселя між сухим та мокрим краями:

$$SMI\_OPTRAM = \frac{(STR_{\text{пікселя}} - STR_{\text{сухого_краю}})}{(STR_{\text{мокрого_краю}} - STR_{\text{сухого_краю}})}$$

Значення 0 відповідає сухому краю, 1 – мокрому.

- **Переваги OPTRAM для Sentinel-2:**
  - **Сумісність з даними:** Використовує лише оптичні канали, наявні

на Sentinel-2 з високою просторовою роздільною здатністю (10-20м), що усуває проблему розбіжності даних.

- **Стабільність:** STR значно менш чутливий до миттєвих атмосферних умов (температури, вітру) порівняно з LST. Це створює потенціал для розробки більш універсальної параметризації країв для конкретної місцевості та типу рослинності, яка може бути дійсною для різних дат, що значно спрощує довгостроковий моніторинг [2].
- **Обмеження OPTRAM:** Попри переваги, модель має обмеження, такі як чутливість до типу рослинності та структури рослинного покриву (однакове значення STR може відповідати різному вмісту вологи для різних культур), а також вплив глибоких тіней та відкритої води, які можуть давати аномально високі значення STR і потребують маскування [2].

Враховуючи наявність всіх необхідних каналів на Sentinel-2, відсутність потреби у важкодоступних теплових даних та більший потенціал для стабільної параметризації, модель OPTRAM була обрана як основна для розробки інформаційної системи оцінки посухи в даній кваліфікаційній роботі.

### 1.1.6 Існуючі інформаційні системи та підходи до моніторингу посух

Моніторинг посух є важливою задачею глобального, регіонального та національного рівнів. Існує низка інформаційних систем та підходів, які використовують різноманітні дані та методи для відстеження цього явища. Їх можна умовно поділити на глобальні/континентальні системи та регіональні/локальні підходи.

- **Глобальні та континентальні системи моніторингу:** Ці системи призначені для надання загальної картини посушливих умов на великих територіях.
  - **Global Drought Observatory (GDO)** Європейського Об'єднаного Дослідницького Центру (JRC): Ця система надає глобальну

інформацію про посухи, використовуючи комбінацію індикаторів. Основними є Standardized Precipitation Index (SPI), аномалії вологості ґрунту (отримані з гідрологічних моделей) та стан вегетації (наприклад, аномалія fAPAR – частки поглинутої фотосинтетично активної радіації, розрахована за супутниковими даними). GDO генерує карти ризику та впливу посухи, що є важливим для міжнародних гуманітарних організацій.

- **U.S. Drought Monitor (USDM):** Унікальний приклад інтегрованого підходу, що поєднує об'єктивні дані з експертними оцінками. Система використовує числові індекси (SPI, NDVI, модельовану вологість ґрунту) та дані з різних джерел, але фінальна карта категорій посухи (від D0 до D4) створюється щотижня групою експертів на основі консенсусу. Це дозволяє враховувати локальні особливості, не завжди помітні лише за супутниковими даними.
- **Copernicus Emergency Management Service (CEMS) – European Drought Observatory (EDO):** Цей сервіс програми Copernicus фокусується на Європі та надає оперативну інформацію та прогнози. Ключовим продуктом є Комбінований Індикатор Посухи (Combined Drought Indicator - CDI), який інтегрує три показники: опади (через SPI), вологість ґрунту (аномалії з моделі LISFLOOD) та стрес рослинності (аномалія fAPAR).
- **Типові індикатори, що використовуються в існуючих системах:**
  - **Метеорологічні:** SPI (Standardized Precipitation Index), SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), що базуються на даних про опади та температуру з метеостанцій.
  - **Вегетаційні:** NDVI (та його аномалії), EVI, VCI (Vegetation Condition Index), fAPAR. Зазвичай використовуються дані з сенсорів MODIS, AVHRR, VIIRS через їх високу часову роздільну здатність (1-2 рази на день) та глобальне покриття.
  - **Температурні:** LST (та його аномалії), TCI (Temperature Condition Index).

- **Вологість ґрунту:** Зазвичай використовуються модельовані значення з глобальних гідрологічних моделей (напр., GLDAS) або дані з мікрохвильових супутникових сенсорів (SMAP, SMOS), які надають прями вимірювання вологості поверхневого шару ґрунту.
- **Проблеми та обмеження існуючих систем на локальному рівні:** Ключовим недоліком більшості глобальних та континентальних систем є їх **низька просторова роздільна здатність**. Дані з MODIS (250м-1км), AVHRR (1км), SMAP/SMOS (~30-40км) не дозволяють оцінювати вплив посухи на рівні окремих сільськогосподарських полів, де умови можуть значно варіювати через мікрорельєф, тип ґрунту або агротехніку. Крім того, існуючі системи, як правило, не інтегрують сучасні моделі оцінки вологості, адаптовані для використання з даними високої роздільної здатності, як Sentinel-2. Системи, які б поєднували високу роздільну здатність (~10м), сучасну модель оцінки вологості (OPTRAM) та були б сфокусовані на конкретній культурі (кукурудза) в межах певного регіону (Дніпропетровська область), наразі відсутні або знаходяться на ранніх стадіях розробки.

Аналіз існуючих систем та підходів показує, що хоча на макрорівні існують ефективні інструменти моніторингу посух, існує потреба в розробці інформаційних систем, орієнтованих на локальний рівень та конкретні сільськогосподарські культури, з використанням переваг даних Sentinel-2 та сучасних моделей, таких як OPTRAM. Це визначає науково-практичну новизну та актуальність даної кваліфікаційної роботи.

## 1.2 Висновки до розділу 1

Проведений аналіз літературних джерел та стану області рішення завдання дозволяє зробити наступні висновки:

1. Посуха є серйозною загрозою для сільського господарства, зокрема для вирощування кукурудзи в Дніпропетровській області, і потребує ефективних інструментів для моніторингу та оцінки її впливу.

Технології ДЗЗ, особливо дані супутників Sentinel-2 з їх високою просторовою, часовою та спектральною роздільною здатністю, надають унікальні можливості для детального спостереження за станом посівів.

2. Спектральні індекси (NDVI, індекси на основі SWIR та Red Edge каналів) є важливими індикаторами стану рослинності та її реакції на водний стрес.
3. Трапецоїдні моделі дозволяють інтегрувати інформацію про стан рослинності та умови зволоження для отримання кількісної оцінки вологості. Модель OPTRAM, на відміну від TOTRAM, не потребує теплових даних і є придатною для використання з даними Sentinel-2, хоча й має свої обмеження, пов'язані з впливом типу рослинності та чутливістю до води/тіней.
4. Існує потреба в розробці спеціалізованої інформаційної системи, яка б використовувала переваги даних Sentinel-2 та моделі OPTRAM для оперативного моніторингу впливу посухи на посіви кукурудзи на регіональному/локальному рівні.

Таким чином, розробка інформаційної системи оцінки впливу посух на стан сільськогосподарських культур (кукурудзи) за даними Sentinel-2 з використанням моделі OPTRAM є **актуальним та практично значущим завданням.**

### **Завдання кваліфікаційної роботи:**

Виходячи з проведеного аналізу, для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

Провести аналіз та відбір даних Sentinel-2 для експериментального поля кукурудзи в Дніпропетровській області за липень 2019-2024 рр.

1. Виконати розрахунок необхідних спектральних індексів (NDVI, STR) за відібраними супутниковими даними.
2. Реалізувати алгоритм моделі OPTRAM, включаючи визначення параметрів "сухого" та "мокрого" країв трапеції STR-NDVI.
3. Розрахувати часові ряди індексу вологості OPTRAM для

досліджуваної території та періоду.

4. Розробити архітектуру інформаційної системи для обробки даних, розрахунку індексів та візуалізації результатів оцінки впливу посухи.
5. Створити програмні компоненти інформаційної системи для автоматизації процесу аналізу.
6. Проаналізувати отримані результати (карти та часові ряди індексу OPTRAM), оцінити їх відповідність відомим посушливим періодам (за даними опадів, температури або іншими джерелами, якщо доступні).

## РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНІ РІШЕННЯ

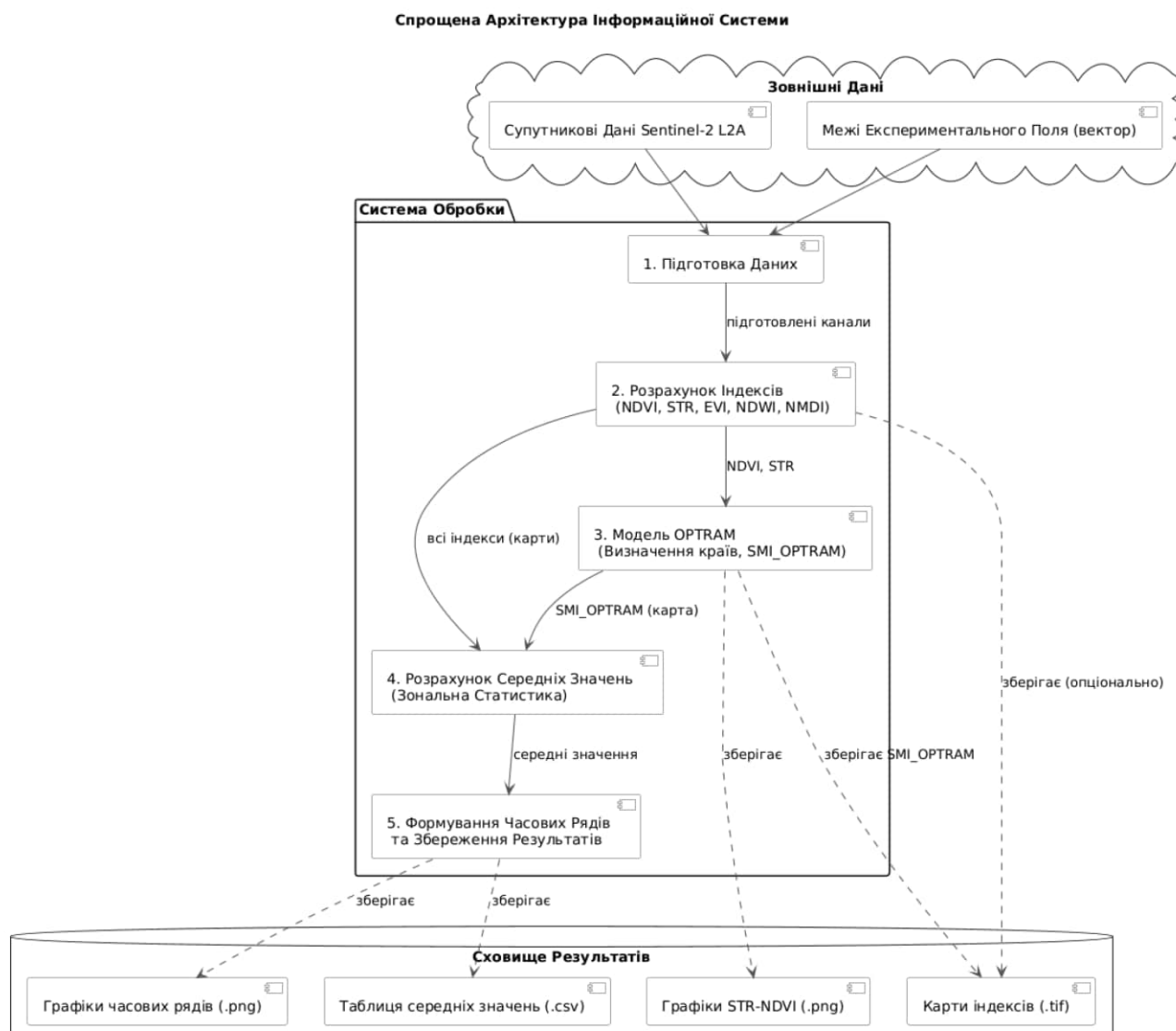
У цьому розділі детально описано розробку та реалізацію інформаційної системи, призначеної для оцінки впливу посушливих явищ на стан посівів кукурудзи. В основу системи покладено використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з європейських супутників Sentinel-2 та застосування оптичної трапецоїдної моделі (OPTRAM) для розрахунку індексу вологості. Розглянуто архітектурні аспекти системи, детально описано етапи підготовки та обробки вхідних супутникових і векторних даних, алгоритми розрахунку ключових спектральних індексів та індексу вологості SMI\_OPTRAM, а також інструментальні засоби, обрані для програмної реалізації системи.

### 2.1 Загальна архітектура інформаційної системи

Розроблена інформаційна система призначена для автоматизованої оцінки впливу посухи на посіви кукурудзи шляхом обробки та аналізу багатоканальних супутникових даних. З огляду на специфіку задачі, що вимагає виконання послідовного ланцюга операцій – від завантаження даних до аналізу кінцевих продуктів, – була обрана **модульна архітектура**. Такий підхід забезпечує низку переваг:

- **Гнучкість та розширюваність:** Кожен етап обробки інкапсульовано в окремий логічний модуль. Це дозволяє в майбутньому легко модифікувати або замінювати окремі компоненти (наприклад, додати підтримку інших супутникових даних або реалізувати альтернативну модель оцінки вологості), не змінюючи всю систему.
- **Тестованість:** Ізольованість модулів спрощує їх тестування та налагодження.
- **Зрозумілість:** Логічне розмежування функцій робить архітектуру та код системи більш зрозумілими та легкими для супроводу.

Архітектура системи, представлена на Рисунку 2.1, включає п'ять основних компонентів, взаємодія між якими реалізована за допомогою програмних скриптів мовою Python.



**(Рисунок 2.1 – Загальна архітектура інформаційної системи)**

Розглянемо детальніше функції та взаємодію кожного модуля.

### 1. Модуль доступу та підготовки даних (Data Preparation Module):

- **Призначення:** Цей модуль є вхідною точкою системи і відповідає за збір, перевірку та попередню обробку всіх необхідних даних.
- **Функції:**
  - **Організація доступу до даних:** Модуль оперує шляхами до вихідних файлів, які зберігаються в заздалегідь визначеній структурі директорій. Передбачається, що для кожної дати зйомки створюється окрема папка, в якій знаходяться файли

відповідних каналів Sentinel-2.

- **Зчитування растрових даних:** Використовуючи бібліотеку Rasterio, модуль зчитує геопросторові дані з файлів GeoTIFF у вигляді багатовимірних масивів NumPy, а також витягує метадані растру (профіль), що включають систему координат, географічну прив'язку (афінне перетворення) та розміри.
- **Перевірка цілісності:** Здійснюється перевірка наявності всіх необхідних файлів каналів (B02, B04, B08, B8A, B11, B12) для заданої дати. У разі відсутності хоча б одного файлу, обробка для даної дати припиняється з виведенням відповідного повідомлення.
- **Ресемплінг (Resampling):** Оскільки канали Sentinel-2 мають різну нативну просторову роздільну здатність (10м та 20м), цей крок є критично важливим для їх суміщення. Модуль приводить всі канали до єдиної роздільної здатності 10 метрів. Як еталон використовується профіль одного з 10-метрових каналів (наприклад, B02). Канали з роздільною здатністю 20м (B8A, B11, B12) ресемплюються за допомогою методу **білінійної інтерполяції**. Цей метод був обраний як компроміс між швидкістю обчислення та якістю результату, оскільки він згладжує вихідні дані, що є прийнятним для безперервних полів, таких як відбиття.
- **Завантаження векторних даних:** Модуль завантажує векторний файл (ESRI Shapefile), що містить полігон експериментального поля, за допомогою бібліотеки Geopandas.
- **Взаємодія:**
  - **Вхід:** Шляхи до папок з даними, дата, шлях до векторного файлу.
  - **Вихід:** Підготовлені масиви NumPy для кожного спектрального каналу, приведені до однакової роздільної здатності (10м); профіль еталонного 10-метрового растру; геометрія полігону поля. Ці дані передаються до наступних модулів для обробки.

## 2. Модуль розрахунку спектральних індексів (Spectral Indices Calculation Module):

- **Призначення:** Розрахунок набору спектральних індексів, що характеризують різні аспекти стану рослинності та умов зволоження.
- **Функції:** Реалізує математичні операції над підготовленими масивами даних відповідно до формул індексів (детально описані в підрозділі 2.3.1). Обчислення є попіксельними, тобто для кожного пікселя на вихідній карті індексу його значення розраховується на основі значень відповідних пікселів у вхідних каналах. Модуль генерує карти для NDVI, STR, EVI, NDWI та NMDI.
- **Взаємодія:**
  - **Вхід:** Підготовлені масиви даних каналів від Модуля підготовки даних.
  - **Вихід:** Розраховані карти індексів у вигляді масивів NumPy. Карти NDVI та STR передаються до Модуля реалізації моделі OPTRAM, а всі карти – до Модуля аналізу часових рядів та Модуля візуалізації та збереження.

## 3. Модуль реалізації моделі OPTRAM (OPTRAM Model Implementation Module):

- **Призначення:** Розрахунок відносного індексу вологості SMI\_OPTRAM. Це серцевина системи, що реалізує наукову модель.
- **Функції:**
  - **Побудова простору STR-NDVI:** Використовує розраховані карти NDVI та STR.
  - **Статистичний аналіз:** Фільтрує дані, виконує бінінг NDVI та розраховує перцентилі STR для визначення "сухого" та "мокрого" країв.
  - **Апроксимація:** Будує лінійні регресії для країв.
  - **Нормалізація:** Попіксельно розраховує значення SMI\_OPTRAM, нормалізуючи значення STR кожного пікселя відносно визначених країв.

- **Взаємодія:**
  - **Вхід:** Карти NDVI та STR від Модуля розрахунку індексів.
  - **Вихід:** Карта SMI\_OPTRAM у вигляді масиву NumPy, а також дані для побудови діаграми розсіювання.

#### 4. Модуль аналізу часових рядів (Time Series Analysis Module):

- **Призначення:** Проведення узагальненого аналізу динаміки показників у часі.
- **Функції:**
  - **Ітерація по датах:** Модуль працює в циклі, обробляючи дані для кожної дати зі списку.
  - **Зональна статистика:** Для кожної дати та для кожної згенерованої карти індексу обчислює середнє значення (mean) пікселів, що потрапляють всередину полігону експериментального поля. Для цього використовується бібліотека rasterstats.
  - **Накопичення даних:** Зберігає обчислені середні значення у структуру даних (словник, потім Pandas DataFrame), пов'язуючи їх з відповідною датою.
- **Взаємодія:**
  - **Вхід:** Набір карт всіх розрахованих індексів для всіх дат та геометрія поля.
  - **Вихід:** Таблиця Pandas DataFrame з часовими рядами середніх значень, яка передається до Модуля візуалізації та збереження.

#### 5. Модуль візуалізації та збереження результатів (Output Generation Module):

- **Призначення:** Представлення результатів обробки та аналізу у зрозумілому для користувача вигляді та їх збереження для подальшого використання.
- **Функції:**
  - **Збереження растрових карт:** Зберігає всі проміжні та кінцеві

карти індексів (NDVI, STR, EVI, NDWI, NMDI, SMI\_OPTRAM) у форматі GeoTIFF, зберігаючи геопросторову прив'язку з еталонного профілю.

- **Генерація графіків:**

- Для кожної дати створює та зберігає діаграму розсіювання STR vs NDVI з лініями країв моделі OPTRAM у форматі PNG.
- Після обробки всіх дат будує та зберігає набір графіків часових рядів середніх значень кожного індексу у форматі PNG.

- **Збереження табличних даних:** Зберігає підсумковий DataFrame з часовими рядами середніх значень у текстовий файл формату CSV.

- **Взаємодія:** Отримує дані від усіх попередніх модулів і не передає їх далі, а зберігає у файлової системі.

Обрана модульна архітектура дозволила чітко розмежувати задачі, спростити розробку та налагодження кожного компонента, а також закласти основу для подальшого розвитку системи.

## 2.2 Вхідні дані та їх підготовка

Якість та узгодженість вхідних даних є фундаментальною передумовою для отримання достовірних результатів в будь-якій геоінформаційній системі. Розроблена система використовує два основних типи вхідних даних: супутникові знімки Sentinel-2 рівня обробки L2A та векторні дані, що визначають межі досліджуваної території. Процес їх підготовки, реалізований у Модулі доступу та підготовки даних, включає завантаження, перевірку, конвертацію форматів та, за необхідності, геометричні перетворення для забезпечення просторової сумісності.

### 2.2.1 Супутникові дані Sentinel-2 L2A

Вибір супутникових даних є ключовим рішенням, що визначає потенційну точність та деталізацію моніторингу. Для даної роботи були обрані дані місії Sentinel-2, яка є частиною європейської програми моніторингу Землі Copernicus. Цей вибір обґрунтований низкою унікальних переваг, що роблять ці дані оптимальними для агромоніторингу на локальному рівні.

- **Джерело даних та вибір продукту:** Вихідні супутникові дані для дослідження отримувалися через веб-інтерфейс Copernicus Browser ([dataspace.copernicus.eu](https://dataspace.copernicus.eu)), який є частиною Copernicus Data Space Ecosystem. Цей портал надає вільний та оперативний доступ до широкого спектру продуктів програми Copernicus, включаючи дані супутників Sentinel. Для цілей даної роботи було обрано продукт Sentinel-2 рівня обробки L2A. Продукт L2A є ключовим, оскільки він надає значення коефіцієнта відбиття поверхні Землі (Bottom-Of-Atmosphere (BOA) reflectance), які вже пройшли атмосферну корекцію. Це означає, що вплив атмосфери (розсіювання та поглинання сонячного випромінювання молекулами газів та аерозолями) на виміряні значення відбиття вже мінімізовано, що підвищує точність та порівнюваність даних, отриманих у різні дати та за різних атмосферних умов.
- **Обрані спектральні канали, їх характеристики та призначення:** Мультиспектральний інструмент (MSI) на борту супутників Sentinel-2A та Sentinel-2B реєструє дані у 13 спектральних каналах. Для розрахунку цільових спектральних індексів, необхідних для функціонування моделі OPTRAM та комплексного аналізу стану рослинності, були відібрані наступні канали:
  - **B02 (Blue):** Центральна довжина хвилі ~492 нм, просторова роздільна здатність 10 метрів. Цей канал використовується у формулі розрахунку індексу EVI для корекції атмосферних впливів, зокрема аерозольного розсіювання.
  - **B04 (Red):** Центральна довжина хвилі ~665 нм, просторова

роздільна здатність 10 метрів. Червоний канал є критично важливим для оцінки фотосинтетичної активності рослин, оскільки хлорофіл сильно поглинає світло в цій частині спектру. Використовується для розрахунку NDVI та EVI.

- **B08 (NIR – Near Infrared):** Центральна довжина хвилі ~833 нм (для S2A) / ~835 нм (для S2B), просторова роздільна здатність 10 метрів. Здорова рослинність сильно відбиває випромінювання у ближньому інфрачервоному діапазоні через структуру клітин листя. Цей канал є ключовим для розрахунку NDVI та EVI.
- **B8A (NIR Narrow):** Центральна довжина хвилі ~865 нм, просторова роздільна здатність 20 метрів. Цей вузький канал у ближньому інфрачервоному діапазоні розташований поза основними смугами поглинання водяної пари, що робить його менш чутливим до її вмісту в атмосфері порівняно з ширшим каналом B08. Тому канал B8A рекомендований для розрахунку індексів, чутливих до вмісту води в рослинності, таких як NDWI та NMDI.
- **B11 (SWIR1):** Центральна довжина хвилі ~1613 нм (для S2A) / ~1610 нм (для S2B), просторова роздільна здатність 20 метрів. Короткохвильове інфрачервоне випромінювання в цьому діапазоні сильно поглинається водою. Тому цей канал є інформативним для оцінки вмісту вологи в рослинності та ґрунті. Використовується для розрахунку NDWI та NMDI.
- **B12 (SWIR2):** Центральна довжина хвилі ~2202 нм (для S2A) / ~2186 нм (для S2B), просторова роздільна здатність 20 метрів. Цей канал також знаходиться у смузі сильного поглинання води і є ще більш чутливим до вмісту вологи, ніж B11. У даній роботі канал B12 використовується для розрахунку трансформованого відбиття (STR) в моделі OPTRAM, а також є компонентом індексу NMDI.
- **Формат файлів, значення пікселів та масштабування:**  
Завантажені з Copernicus Browser окремі канали зберігалися у

форматі TIFF з типом даних 32-bit float. Проведений попередній аналіз метаданих та значень пікселів у ГІС-програмі QGIS (описаний у попередніх обговореннях) показав, що при виборі такого формату для "сирих" (Raw) каналів, сервіс надає дані, значення яких вже представляють фізичні коефіцієнти відбиття поверхні. Ці значення знаходяться в діапазоні приблизно від 0.0 до 1.0 (або трохи вище для дуже яскравих об'єктів). Це означає, що стандартний масштабний коефіцієнт (зазвичай ділення на 10000), який застосовується до продуктів Sentinel-2 L2A, що зберігаються як цілі 16-бітні числа (Digital Numbers), у даному випадку не потрібен. Тому в програмному коді SCALING\_FACTOR встановлено в 1.0.

- **Часовий діапазон та критерії відбору знімків:**

Для аналізу динаміки посухи було відібрано супутникові знімки, що охоплюють липневі періоди для кожного року з 2019 по 2024 рр. включно. Липень був обраний як місяць, що є репрезентативним для піку вегетації кукурудзи в умовах Дніпропетровської області, а також часто характеризується високими температурами та можливим дефіцитом опадів, що сприяє розвитку посушливих явищ. Для кожної дати відбирався один знімок Sentinel-2 L2A з мінімально можливою хмарністю над територією експериментального поля.

- **Система координат та просторова роздільна здатність:**

Усі завантажені супутникові дані були обрані або трансформовані до єдиної проєктованої системи координат UTM Zone 36N на базі датуму WGS 84 (EPSG:32636). Використання проєктованої системи координат є важливим для коректних геометричних розрахунків, таких як зональна статистика, та для уникнення спотворень, властивих географічним системам координат на великих територіях. Як зазначалося, канали Sentinel-2 мають різну нативну просторову роздільну здатність (10м для B02, B04, B08; 20м для B8A, B11, B12). Для забезпечення узгодженості та можливості попиксельних розрахунків індексів, що використовують канали з різною вихідною роздільною здатністю, канали з нижчою роздільною здатністю (B8A,

B11, B12) підлягають ресемплінгу до цільової роздільної здатності 10 метрів. Ця операція виконується програмно в Модулі підготовки даних з використанням методу білінійної інтерполяції. Еталонним профілем для ресемплінгу слугує профіль одного з 10-метрових каналів (наприклад, B02).

### 2.2.2 Векторні дані меж експериментального поля

Для усереднення значень розрахованих індексів та аналізу їх динаміки саме для досліджуваної території необхідний векторний файл, що точно окреслює її межі:

- **Формат файлу:** Для визначення меж експериментального поля кукурудзи використовується векторний файл у форматі **ESRI Shapefile** (.shp). Цей формат є галузевим стандартом і широко підтримується більшістю ГІС-програм та бібліотек для обробки геопросторових даних, включаючи geopandas, що використовується в даній роботі. Файл був створений шляхом оцифровки меж поля в ГІС-програмі QGIS на основі супутникового знімка високої роздільної здатності.
- **Зміст файлу:** Shapefile містить один полігональний об'єкт, який точно відповідає географічним межам експериментального поля, де вирощується кукурудза. Точність оцифровки цього полігону є важливою для коректного розрахунку середніх значень індексів.
- **Система координат:** Система координат векторного файлу меж поля була приведена у відповідність до системи координат супутникових даних – EPSG:32636 (WGS 84 / UTM Zone 36N). Програмний модуль також включає перевірку на відповідність систем координат растрових та векторних даних і, за необхідності, виконує репроекцію векторного файлу "на льоту" перед розрахунком зональної статистики. Це критично для забезпечення правильного просторового накладання маски поля на карти індексів.
- **Призначення файлу:** Геометрія полігону з цього файлу використовується функцією `zonal_stats` з бібліотеки `rasterstats` для

вибірки значень пікселів з карт спектральних індексів, що потрапляють всередину меж поля, та подальшого обчислення їх середнього значення. Це дозволяє отримати узагальнену кількісну характеристику стану рослинності та умов зволоження для всього поля на кожну дату зйомки.

Ретельна підготовка та узгодження цих двох типів вхідних даних (супутникових та векторних) є запорукою отримання якісних та надійних результатів дослідження.

## 2.3 Методи та алгоритми обробки даних

Після успішного завантаження та попередньої підготовки вихідних супутникових та векторних даних, інформаційна система приступає до основного етапу – розрахунку спектральних індексів та індексу вологості, що базується на моделі OPTRAM. Цей підрозділ детально описує математичні основи та алгоритмічну реалізацію цих розрахунків.

### 2.3.1 Розрахунок спектральних індексів

Спектральні індекси є кількісними показниками, що отримуються шляхом математичних комбінацій значень відбиття у різних спектральних каналах. Вони призначені для підсилення певних характеристик земної поверхні, таких як стан рослинності, вміст води, або виявлення специфічних матеріалів, нівелюючи при цьому деякі зовнішні впливи (наприклад, освітлення). У розробленій системі реалізовано розрахунок п'яти ключових індексів з використанням відповідних каналів Sentinel-2, попередньо приведених до єдиної просторової роздільної здатності 10 метрів:

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Нормалізований Різницевий Вегетаційний Індекс):**

Це один із найстаріших та найпоширеніших індексів для оцінки наявності, щільності та "здоров'я" зеленої фотосинтезуючої рослинності. Його розрахунок базується на різниці у відбитті між ближнім інфрачервоним (NIR) та червоним (Red) діапазонами спектру:

$$NDVI = \frac{\text{Канал}_{NIR} - \text{Канал}_{RED}}{\text{Канал}_{NIR} + \text{Канал}_{RED}}$$

Для даних Sentinel-2 використовується:

$$NDVI = \frac{B08_{10m} - B04_{10m}}{B08_{10m} + B04_{10m}}$$

де B08\_10m та B04\_10m – це значення відбиття у відповідних каналах, приведені до 10м роздільної здатності. Здорова рослинність активно поглинає червоне світло для фотосинтезу та сильно відбиває NIR випромінювання завдяки внутрішній структурі листя. Значення NDVI варіюють від -1 до +1. Для рослинності типові значення позитивні: густа, здорова рослинність зазвичай має NDVI > 0.5, розріджена або стресована – 0.2-0.5, тоді як відкритий ґрунт, штучні поверхні або вода мають значення близькі до нуля або негативні. NDVI є основним індексом вегетації, що використовується в моделі OPTRAM.

- **EVI (Enhanced Vegetation Index – Покращений Вегетаційний Індекс):**

EVI був розроблений для подолання деяких обмежень NDVI, зокрема його насичення при високій щільності біомаси та чутливості до впливу атмосфери та фону ґрунту. Він включає синій канал для корекції атмосферних ефектів. Типова формула:

$$EVI = G * \frac{(\text{Канал}_{NIR} - \text{Канал}_{Red})}{\text{Канал}_{NIR} + C1 * \text{Канал}_{Red} - C2 * \text{Канал}_{Blue} + L}$$

Для Sentinel – 2, використовуючи стандартні коефіцієнти (G = 2.5, C1 = 6, C2 = 7.5, L = 1):

$$EVI = 2.5 * \frac{B08_{10m} - B04_{10m}}{B08_{10m} + 6 * B04_{10m} - 7.5 * B02_{10m} + 1}$$

EVI вважається більш чутливим до структурних варіацій рослинного покриву, особливо в лісах та щільних посівах.

- **NDWI (Normalized Difference Water Index, за Gao, 1996 – Нормалізований Різницевий Водний Індекс):**  
Цей варіант NDWI спеціально розроблений для оцінки вмісту рідкої води в листі рослин. Він чутливий до змін у водному балансі рослинності.

$$NDWI = \frac{\left( \text{Канал}_{NIR_{\text{вузький}}} - \text{Канал}_{SWIR1} \right)}{\left( \text{Канал}_{NIR_{\text{вузький}}} + \text{Канал}_{SWIR1} \right)}$$

Для

Sentinel-2:

$$NDWI = \frac{(B8A_{10m} - B11_{10m})}{(B8A_{10m} + B11_{10m})}$$

Канал B8A (вузький NIR, ~865 нм) менш чутливий до водяної пари в атмосфері, а канал B11 (SWIR1, ~1610 нм) сильно поглинається водою в листі. Зменшення значень NDWI зазвичай свідчить про водний стрес у рослин.

- **NMDI (Normalized Multi-band Drought Index – Нормалізований Багатоканальний Індекс Посухи):**  
NMDI є комплексним індикатором посухи, який враховує як стан вегетації (через NIR), так і вміст води, використовуючи інформацію з двох різних SWIR каналів. Він чутливий до вологості як рослинності, так і верхнього шару ґрунту.

$$NMDI = \frac{\left( \text{Канал}_{NIR_{\text{вузький}}} - (\text{Канал}_{SWIR1} - \text{Канал}_{SWIR2}) \right)}{\left( \text{Канал}_{NIR_{\text{вузький}}} + (\text{Канал}_{SWIR1} - \text{Канал}_{SWIR2}) \right)}$$

Для

Sentinel-2:

$$NMDI = \frac{(B8A_{10m} - (B11_{10m} - B12_{10m}))}{(B8A_{10m} + (B11_{10m} - B12_{10m}))}$$

Різниця між каналами SWIR1 (B11) та SWIR2 (B12) відображає форму кривої поглинання води. Нижчі значення NMDI зазвичай вказують на

сильніші умови посухи.

- **STR (Shortwave Infrared Transformed Reflectance – Трансформоване Відбиття у Короткохвильовому Інфрачервоному діапазоні):**

STR є не співвідношенням каналів, а математичною трансформацією значення відбиття в одному з SWIR каналів, що сильно поглинається водою. Ця трансформація була запропонована для лінеаризації зв'язку між сигналом SWIR та вмістом вологи.

$$STR = \frac{(1 - R_{SWIR2})^2}{(2 * R_{SWIR2})}$$

Для Sentinel-2 (використовуючи канал B12):

$$STR = \frac{(1 - \text{Відбиття}_{B12_{10m}})^2}{(2 * \text{Відбиття}_{B12_{10m}})}$$

Високі значення STR відповідають вологим умовам (низьке відбиття у B12 через сильне поглинання водою), тоді як низькі значення STR вказують на сухі умови (високе відбиття у B12). STR є ключовим компонентом для побудови моделі OPTRAM.

Обчислення цих індексів для кожного пікселя супутникового знімка створює набір растрових карт, кожна з яких візуалізує просторовий розподіл досліджуваних характеристик.

### 2.3.2 Реалізація моделі OPTRAM для розрахунку SMI\_OPTRAM

Індекс вологості ґрунту/рослинності SMI\_OPTRAM (Soil Moisture Index from Optical Trapezoid Model) є центральним продуктом розробленої інформаційної системи, призначеним для оцінки відносного рівня зволоження. Алгоритм його розрахунку базується на оптичній трапецоїдній моделі, детально описаній Sadeghi et al. (2017), і включає наступні

деталізовані кроки, реалізовані в програмному модулі:

### 1. Підготовка вхідних даних для моделі:

- Використовуються попередньо розраховані карти NDVI та STR для конкретної дати зйомки.
- Значення пікселів з цих двох карт "вирівнюються" в одновимірні масиви (flattening) для подальшого статистичного аналізу їх спільного розподілу.
- Фільтрація даних: Для побудови країв трапеції використовуються лише ті пікселі, які відповідають вегетованим поверхням та не мають аномальних значень. У програмному коді реалізовано фільтр, який відбирає пікселі, що задовольняють наступним умовам:
  - NDVI знаходиться в діапазоні від 0.1 до 1.0 ( $0.1 \leq NDVI \leq 1.0$ ). Нижня межа (0.1) призначена для виключення відкритого ґрунту, води та інших нерослинних поверхонь, для яких модель OPTRAM не призначена. Верхня межа (1.0) є теоретичним максимумом для NDVI.
  - Значення NDVI та STR не є NaN (Not a Number) або Inf (нескінченність), що можуть виникнути внаслідок помилок у вихідних даних або попередніх розрахунках.

### 2. Визначення "сухого" та "мокрого" країв у просторі STR-NDVI:

**Цей етап є ключовим для моделі OPTRAM. Краї визначають межі діапазону вологості для кожного рівня NDVI, що відповідає екстремальним умовам зволоження.**

- Розбиття на інтервали (бінінг) за NDVI: Відфільтрований діапазон валідних значень NDVI ділиться на фіксовану кількість рівних інтервалів, які називаються бінами. У поточній реалізації використовується 100 бінів, якщо кількість валідних пікселів після фільтрації достатня (більше 100). Якщо валідних пікселів мало, кількість бінів динамічно зменшується (мінімум 2 біни, кількість розраховується як  $\max(2, \text{int}(\text{кількість\_валідних\_NDVI} / 20)) + 1$ ), щоб забезпечити достатню кількість точок у кожному

біні для статистично значущого визначення перцентилів.

- Визначення точок, що формують краї, для кожного біну NDVI:
  - Для кожного окремого біну NDVI (тобто для вузького діапазону значень NDVI) розглядаються всі відповідні значення STR, що потрапляють у цей бін.
  - **"Сухий край"**: Для поточного біну NDVI точка сухого краю визначається як 5-й перцентиль значень STR. Це означає, що 5% пікселів у цьому біні NDVI мають ще нижчі (сухіші) значення STR. Використання 5-го перцентиля замість абсолютного мінімуму робить визначення краю більш стійким до можливих викидів або "шуму" в даних.
  - **"Мокрий край"**: Для поточного біну NDVI точка мокрого краю визначається як 95-й перцентиль значень STR. Це відповідає дуже вологим умовам, близьким до насичення.
  - Для кожної знайденої точки сухого та мокрого краю відповідна координата NDVI встановлюється як центр поточного біну NDVI.
- Апроксимація країв: За наборами отриманих точок (координати NDVI та відповідні їм 5-й та 95-й перцентилі STR) для сухого та мокрого країв будуються лінії апроксимації за допомогою методу лінійної регресії (метод найменших квадратів, реалізований у `scipy.stats.linregress`) для знаходження рівнянь прямих, що найкраще описують ці набори точок:
 
$$\text{STR}_{\text{сухий\_край\_для\_NDVI}}(\text{NDVI}) = \text{нахил\_сухий} * \text{NDVI} + \text{перетин\_сухий}$$

$$\text{STR}_{\text{мокрий\_край\_для\_NDVI}}(\text{NDVI}) = \text{нахил\_мокрий} * \text{NDVI} + \text{перетин\_мокрий}$$
 Розраховуються також коефіцієнти детермінації ( $R^2$ ) для кожної лінії регресії, що характеризують якість апроксимації. Якщо точок для надійної апроксимації недостатньо (менше 2), використовуються значення за замовчуванням (нахил=0, перетин

= загальний мінімум/максимум STR для всіх валідних пікселів).

3. Розрахунок індексу SMI\_OPTRAM для кожного пікселя: Маючи рівняння для сухого та мокрого країв, для кожного пікселя вихідного знімка (для якого розраховано NDVI та STR) обчислюється індекс SMI\_OPTRAM:

$$SMI_{OPTRAM_{\text{пікселя}}} = \frac{\left( STR_{\text{пікселя}} - STR_{\text{сухого_краю_для\_NDVI_{\text{пікселя}}}} \right)}{\left( STR_{\text{мокрого_краю_для\_NDVI_{\text{пікселя}}}} - STR_{\text{сухого_краю_для\_NDVI_{\text{пікселя}}}} \right)}$$

4. де STR\_пікселя – це значення STR для поточного пікселя, а STR\_сухого\_краю\_для\_NDVI\_пікселя та STR\_мокрого\_краю\_для\_NDVI\_пікселя – це значення STR, розраховані за рівняннями відповідних країв, використовуючи значення NDVI поточного пікселя.

- Нормалізація та обробка некоректних значень:

- Отримані значення SMI\_OPTRAM обмежуються стандартним діапазоном \*\*\*\* за допомогою функції pr.clip. Значення 0 відповідає умовам "сухого краю" (найсухіші умови), а 1 – умовам "мокрого краю" (найвологіші умови).
- Особлива увага приділяється знаменнику у формулі SMI. Якщо знаменник (різниця між мокрим та сухим краєм) менший за встановлений мінімальний поріг (у даній реалізації 0.1), або якщо розрахований мокрий край виявляється нижчим або рівним сухому краю (що фізично некоректно і може статися при поганій апроксимації країв або дуже вузькому діапазоні вологості на сцені), такому пікселю присвоюється значення NaN (відсутні дані), щоб уникнути ділення на нуль або отримання неінтерпретованих значень SMI.
- Також значення NaN присвоюються тим пікселям, які були відфільтровані на першому етапі підготовки даних для моделі (тобто, де NDVI < 0.1 або NDVI > 1.0, або де NDVI

чи STR були NaN або Inf).

Результатом виконання цього алгоритму є растрова карта SMI\_OPTRAM, яка відображає просторовий розподіл відносного рівня зволоження ґрунту та рослинності для досліджуваної території на конкретну дату зйомки. Крім того, генерується діаграма розсіювання STR vs NDVI з нанесеними лініями апроксимації сухого та мокрого країв для візуального контролю якості побудови моделі.

## 2.4 Реалізація програмного модуля та інструментальні засоби

Для автоматизації процесу обробки супутникових даних та розрахунку спектральних індексів було розроблено набір програмних модулів (скриптів) мовою програмування Python. Вибір Python як основного інструментального засобу зумовлений його широкими можливостями для наукових обчислень, наявністю великої та добре документованої екосистеми спеціалізованих бібліотек для роботи з геопросторовими даними, а також відносною простотою синтаксису, що дозволяє швидко розробляти та тестувати складні алгоритми.

Архітектурно розробка була розділена на два основних скрипти для логічного розмежування завдань:

1. **main.py (Обробка даних для однієї дати):** Скрипт, призначений для повної обробки даних для однієї заданої користувачем дати. Він є основним інструментом для генерації первинних продуктів – карт індексів.
2. **analyze\_time\_series.py (Аналіз часових рядів):** Скрипт, що використовує вже розраховані карти індексів для аналізу динаміки показників у часі.

Такий підхід забезпечує гнучкість: можна спочатку послідовно згенерувати всі необхідні карти індексів для всього періоду дослідження, а потім окремо запустити їх узагальнений аналіз.

### 2.4.1 Основні бібліотеки, що використовуються, та їх призначення

Функціональність розробленої системи базується на використанні низки ключових бібліотек Python:

- **Rasterio (версія 1.3.x):** Це основна бібліотека для роботи з растровими геопросторовими даними. Її функціонал використовувався для:
  - Читання вихідних файлів GeoTIFF для кожного спектрального каналу Sentinel-2.
  - Доступу до метаданих растру, таких як система координат (CRS), географічна прив'язка (афінне перетворення), розміри та тип даних.
  - Зчитування даних у вигляді багатовимірних масивів NumPy.
  - Реалізації ресемплінгу каналів з нижчою роздільною здатністю за допомогою вбудованого функціоналу `rasterio.enums.Resampling`.
  - Збереження фінальних розрахованих карт індексів у форматі GeoTIFF з коректною геопросторовою прив'язкою.
- **NumPy (версія 1.2x.x):** Фундаментальна бібліотека для наукових обчислень, що є основою для роботи з растровими даними в пам'яті. Використовується для:
  - Зберігання даних пікселів у вигляді ефективних n-вимірних масивів.
  - Виконання швидких попіксельних математичних операцій (арифметичні операції для розрахунку індексів).
  - Маніпуляцій з масивами (зміна форми за допомогою `flatten` для статистичного аналізу).
  - Фільтрації даних (використання логічних масок для виключення пікселів, що не відповідають критеріям).
  - Статистичних розрахунків (наприклад, `np.percentile`, `np.nanmin`, `np.nanmax`).
- **SciPy (версія 1.x.x), зокрема `scipy.stats`:** Використовується для виконання більш складних статистичних розрахунків. У даній роботі модуль `scipy.stats.linregress` застосовується для розрахунку параметрів лінійної регресії (нахил, перетин, коефіцієнт детермінації  $R^2$ ) при

апроксимації "сухого" та "мокрого" країв моделі OPTRAM.

- **Matplotlib (версія 3.x.x):** Потужна бібліотека для створення візуалізацій. У системі вона використовується для:
  - Побудови діаграм розсіювання (scatter plots) у просторі STR vs NDVI для візуального контролю якості побудови моделі OPTRAM для кожної дати.
  - Генерації графіків часових рядів середніх значень кожного розрахованого індексу для візуалізації їх динаміки протягом досліджуваного періоду.
  - Збереження згенерованих графіків у файли формату PNG.
- **Geopandas (версія 0.x.x):** Розширює можливості Pandas для зручної роботи з геопросторовими векторними даними. Використовується для:
  - Читання векторного файлу меж експериментального поля у форматі ESRI Shapefile.
  - Доступу до геометрії полігону.
  - Репроекції системи координат векторного файлу для узгодження з системою координат растрових даних.
- **Rasterstats (версія 0.x.x):** Бібліотека, спеціалізована для розрахунку зональної статистики. Використовується для ключової задачі аналізу часових рядів:
  - Обчислення статистичних показників (у даному випадку – середнього значення mean) растрових даних (карт індексів) в межах векторного полігону (меж поля).
- **Pandas (версія 2.x.x):** Надає високопродуктивні структури даних (зокрема, DataFrame) та інструменти для аналізу даних. Використовується для:
  - Створення та накопичення таблиці з середніми значеннями індексів для всього часового ряду.
  - Зручного маніпулювання табличними даними.
  - Збереження фінальної таблиці у формат CSV для подальшого використання у звітах або інших програмах.
- **OS та Datetime:** Стандартні модулі Python, що використовуються для

роботи з файловою системою (формування шляхів, перевірка існування файлів/папок) та для коректної роботи з датами при побудові графіків.

#### 2.4.2 Функціонал та структура програмних модулів

Як зазначалося, програмна реалізація складається з двох основних скриптів, що виконують логічно розмежовані завдання.

- **Модуль main.py (Обробка даних для однієї дати):**
  - **Призначення:** Цей скрипт є основним інструментом для генерації первинних продуктів – карт індексів. Він приймає на вхід дату та обробляє відповідний набір супутникових знімків.
  - **Функціонал:**
    1. Ініціалізація, отримання шляхів до необхідних каналів Sentinel-2.
    2. Завантаження даних каналів у масиви NumPy.
    3. Виконання ресемплінгу каналів B8A, B11, B12 до 10м (якщо вихідна роздільна здатність відрізняється від еталонної).
    4. Послідовний розрахунок карт п'яти спектральних індексів: NDVI, STR, EVI, NDWI, NMDI.
    5. Збереження кожної розрахованої карти індексу як окремий GeoTIFF файл у папку з вихідними даними.
    6. Реалізація повного алгоритму моделі OPTRAM (фільтрація, бінінг, визначення країв, розрахунок SMI).
    7. Збереження карти SMI\_OPTRAM як GeoTIFF файл.
    8. Генерація та збереження діаграми розсіювання STR vs NDVI для візуального контролю побудованої моделі OPTRAM.
  - Повний лістинг коду модуля main.py наведено в Додатку А.1.
- **Модуль analyze\_time\_series.py (Аналіз часових рядів):**
  - **Призначення:** Цей скрипт виконує агрегацію та аналіз результатів, отриманих модулем main.py для декількох дат.
  - **Функціонал:**

1. Отримання списку дат для аналізу та шляху до векторного файлу меж поля.
2. Ітерація по кожній даті зі списку.
3. Зчитування раніше згенерованих карт індексів (NDVI, EVI, etc.) для поточної дати.
4. Перевірка та, за необхідності, репроекція геометрії поля до системи координат растрових даних.
5. Обчислення середнього значення кожного індексу в межах полігону поля за допомогою зональної статистики.
6. Накопичення середніх значень для всіх дат у структуру даних Pandas DataFrame.
7. Збереження фінальної таблиці з часовими рядами середніх значень у CSV-файл.
8. Побудова та збереження набору графіків, що відображають динаміку кожного індексу в часі.
  - Повний лістинг коду модуля `analyze_time_series.py` наведено в Додатку А.2.

Така двомодульна організація дозволяє гнучко керувати процесом дослідження. Наприклад, можна спочатку виконати ресурсомістку операцію генерації карт індексів для всіх дат за допомогою `main.py`, а потім багаторазово запускати легший скрипт `analyze_time_series.py` для різноманітного аналізу та візуалізації отриманих часових рядів. Це також забезпечує високу відтворюваність результатів.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У цьому розділі представлено та проаналізовано результати застосування розробленої інформаційної системи для оцінки впливу посушливих умов на стан експериментального поля кукурудзи, розташованого в Дніпропетровській області. Аналіз охоплює липневі періоди з 2019 по 2024 рік. Основна увага приділяється просторовому розподілу та часовій динаміці ключових спектральних індексів та індексу вологості SMI\_OPTRAM.

### 3.1 Отримані карти спектральних індексів та індексу вологості SMI\_OPTRAM

Для кожної з шести досліджуваних дат (один безхмарний знімок Sentinel-2 L2A за липень для кожного року з 2019 по 2024) за допомогою розробленого програмного модуля (main.py) були розраховані та збережені у форматі GeoTIFF карти наступних спектральних індексів: Нормалізований Різницевий Вегетаційний Індекс (NDVI), Покращений Вегетаційний Індекс (EVI), Нормалізований Різницевий Водний Індекс за Gao (NDWI), Нормалізований Багатоканальний Індекс Посухи (NMDI), Трансформоване Відбиття у Короткохвильовому Інфрачервоному діапазоні (STR) та, як ключовий результат, Індекс Вологості Ґрунту/Рослинності за моделлю OPTRAM (SMI\_OPTRAM). Усі карти були згенеровані з просторовою роздільною здатністю 10 метрів.

Візуальний аналіз цих карт дозволяє оцінити просторову неоднорідність стану рослинності та умов зволоження як в межах експериментального поля, так і порівняти загальний стан між різними роками. Нижче представлено детальний аналіз кожного типу згенерованих карт.

• **Кarti** **NDVI** **та** **EVI:**

Ці два індекси є ключовими для оцінки щільності та фотосинтетичної активності зеленої рослинності. На картах (приклади для всіх років наведено в Додатку В, Рисунки В.1 – В.12 – *вам потрібно буде додати ці карти та відповідно пронумерувати*) ділянки з високими значеннями індексів (0.7-0.9), які зазвичай візуалізуються насиченими зеленими кольорами, відповідають густому та здоровому рослинному покриву. Низькі значення (0.1-0.4), що відповідають жовтим та червоним кольорам, вказують на розріджену, стресовану або відсутню рослинність.

Порівняльний аналіз карт NDVI/EVI за різні роки дозволяє чітко ідентифікувати періоди інтенсивного росту та періоди пригнічення вегетації. Наприклад, візуальний аналіз карт NDVI для липня **2021 та 2024 років** показує переважно високі значення індексу ( $>0.8$ ) на більшій частині поля, що свідчить про добре розвинений, зімкнутий рослинний покрив кукурудзи. Навпаки, карти за **липень 2019 та 2023 років** демонструють значно нижчі середні значення NDVI (в діапазоні 0.15-0.3) та значну просторову строкатість ("мозаїчність"). Це може вказувати на нерівномірний розвиток, наявність ділянок з пригніченими рослинами або навіть частково відкритим ґрунтом, що є типовою ознакою сильного агро-метеорологічного стресу.

- **Карти**

**NDWI:**

Цей індекс є прямим індикатором вмісту води в листі рослин. Вищі значення (близькі до +1, зазвичай сині відтінки) вказують на добре зволене листя, тоді як низькі та особливо негативні значення (близькі до -1, червоні/жовті відтінки) свідчать про дефіцит вологи в рослинних тканинах. Карти NDWI (Додаток В, Рисунки В.13 – В.18) дозволяють виявити зони поля, де рослини відчувають водний стрес, іноді навіть раніше, ніж це стає помітним за зниженням NDVI. Для **2019 та 2023 років** на картах спостерігаються переважно низькі та навіть негативні значення NDWI, що повністю корелює з низькими NDVI/EVI та підтверджує, що причиною пригнічення рослинності був саме водний стрес. Навпаки, для **2021 та 2024 років** карти NDWI

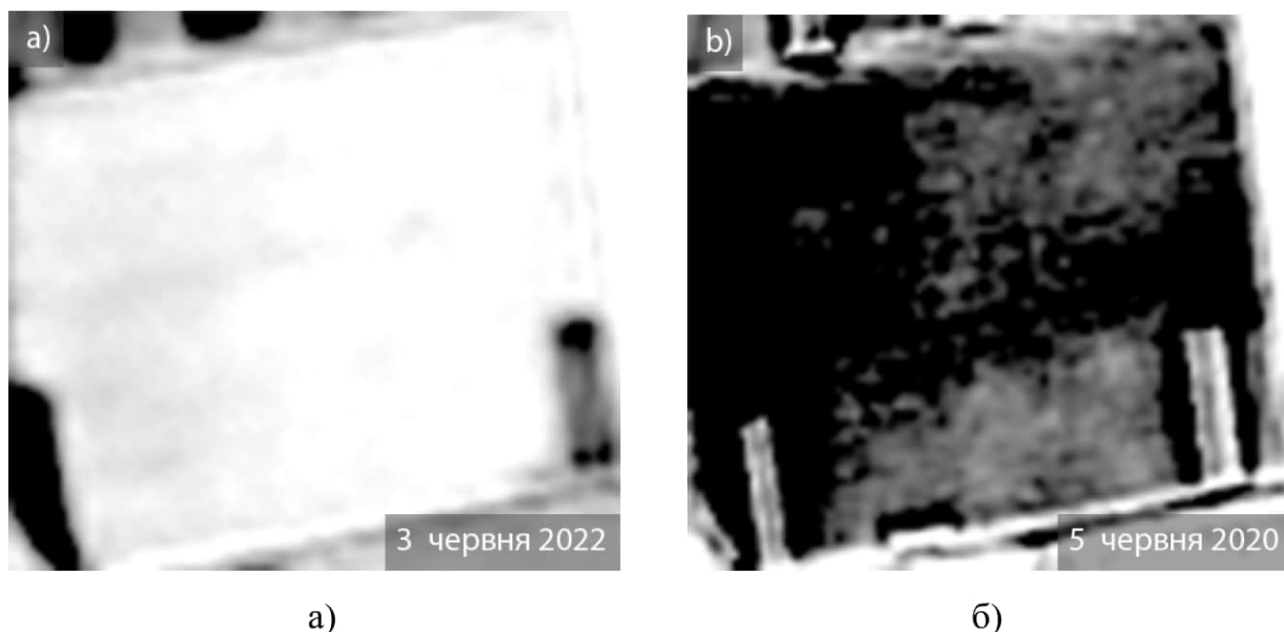
демонструють високі позитивні значення, вказуючи на оптимальний тургор та вологозабезпеченість рослин.

- Карти** **NMDI:**

NMDI є комплексним індикатором посухи, що інтегрує інформацію про біомасу (через NIR) та вологість (через різницю SWIR). Нижчі значення індексу вказують на сильніші посушливі умови. Аналіз карт NMDI (Додаток В, Рисунки В.19 – В.24) показує, що для **2020 року** значення індексу були найнижчими, що може свідчити про найсильніший інтегральний стрес. Проте, як буде показано в аналізі часових рядів, інтерпретація NMDI в даному випадку виявилася неоднозначною і потребує зіставлення з іншими даними, оскільки його значення не завжди прямо корелюють з більш простими індикаторами, як NDWI.
- Карти** **STR:**

STR є показником, обернено пов'язаним з відбиттям у SWIR-діапазоні, і тому прямо корелює з вологістю (вищий STR – вологіше). Карти STR (Додаток В, Рисунки В.25 – В.30) візуалізують абсолютний рівень сигналу, пов'язаного з вологістю. Їх аналіз важливий для розуміння діапазону значень, що використовуються для побудови моделі OPTRAM. Наприклад, у 2021 та 2024 роках значення STR були значно вищими, ніж у 2019 та 2023 роках, вказуючи на вищий абсолютний рівень вологості в перші два згадані роки.
- Карти** **SMI\_OPTRAM:**

Це ключовий результат моделювання, що відображає відносний рівень вологості ґрунту/рослинності, де 0 відповідає найсухішим умовам, а 1 – найвологішим, відносно меж, визначених для кожної конкретної дати. На **Рисунку 3.1** представлені приклади карт SMI\_OPTRAM для двох контрастних за відносним рівнем вологості років, що ілюструють можливості системи.



(Рисунок 3.1 – Приклади карт SMI\_OPTRAM для експериментального поля кукурудзи: а) 2022-07-03 (умови сильного відносного стресу); б) 2020-07-05 (умови, близькі до максимального зволоження).

- **На Рисунку 3.1а)** для 2022-07-03 видно, що більша частина поля має дуже низькі значення SMI (темні кольори), що вказує на сильний водний стрес, оскільки стан поля був близьким до "сухого краю", визначеного для цієї дати. Навпаки, на Рисунку 3.1б) для 2020-07-05 поле має переважно високі значення SMI (світлі кольори), що свідчить про те, що воно було близьким до "мокрого краю", тобто до максимально можливого рівня зволоження для умов того року. Повні набори карт SMI\_OPTRAM для всіх шести років наведені в Додатку В (Рисунки В.1.1 – В.1.6). Їх візуальний аналіз показує не тільки міжрічну мінливість загального рівня вологозабезпеченості, але й варіації в межах самого поля.
- **Аналіз діаграм розсіювання STR vs NDVI для моделі OPTRAM:** Для кожної дати разом з картою SMI\_OPTRAM генерувалася діаграма розсіювання, що ілюструє розподіл пікселів у просторі STR-NDVI та лінії апроксимації "сухого" та "мокрого" країв (приклади для всіх років

наведено в Додатку В, Рисунки В.2.1 – В.2.6). Ці діаграми є важливими для оцінки якості побудови моделі:

- **Форма хмари даних:** Для всіх досліджуваних дат хмара пікселів у просторі STR-NDVI загалом формує очікувану трапецієподібну або трикутну фігуру. Це підтверджує придатність трапецоїдного підходу для даної території та культури.
- **Якість апроксимації країв:** Оцінена за коефіцієнтом детермінації  $R^2$ , якість апроксимації варіює між роками. Наприклад, для знімка за 2021-07-08 (Рисунок В.2.3) обидва краї визначені дуже чітко, з  $R^2$  0.95 для сухого та 0.88 для мокрого краю. Це свідчить про наявність чітко вираженого діапазону вологості на сцені та хорошу лінійну апроксимацію країв. Навпаки, для знімка за 2020-07-05 (Рисунок В.2.2), сухий край мав  $R^2$  лише 0.22, що вказує на значний розкид точок та меншу надійність його лінійної апроксимації. Це може бути пов'язано з більш однорідними умовами зволоження на полі, де важко було виділити "абсолютно сухі" пікселі для даного рівня NDVI.
- **Положення країв:** Положення та нахил країв суттєво змінюються від дати до дати. Наприклад, для 2021 та 2024 років обидва краї розташовані значно вище по осі STR, ніж для 2019 чи 2023 років. Це відображає вищий загальний рівень вологості (і, відповідно, вищі значення STR) у 2021 та 2024 роках.

Аналіз цих діаграм є невід'ємною частиною інтерпретації значень SMI\_OTRAM, оскільки він показує, відносно яких саме меж (визначених для конкретної сцени) розраховувався індекс вологості. Загалом, отримані карти індексів та діаграми розсіювання надають багатий матеріал для подальшого кількісного аналізу часових рядів та оцінки впливу посушливих умов на експериментальне поле кукурудзи.

### 3.2 Аналіз часових рядів середніх значень індексів

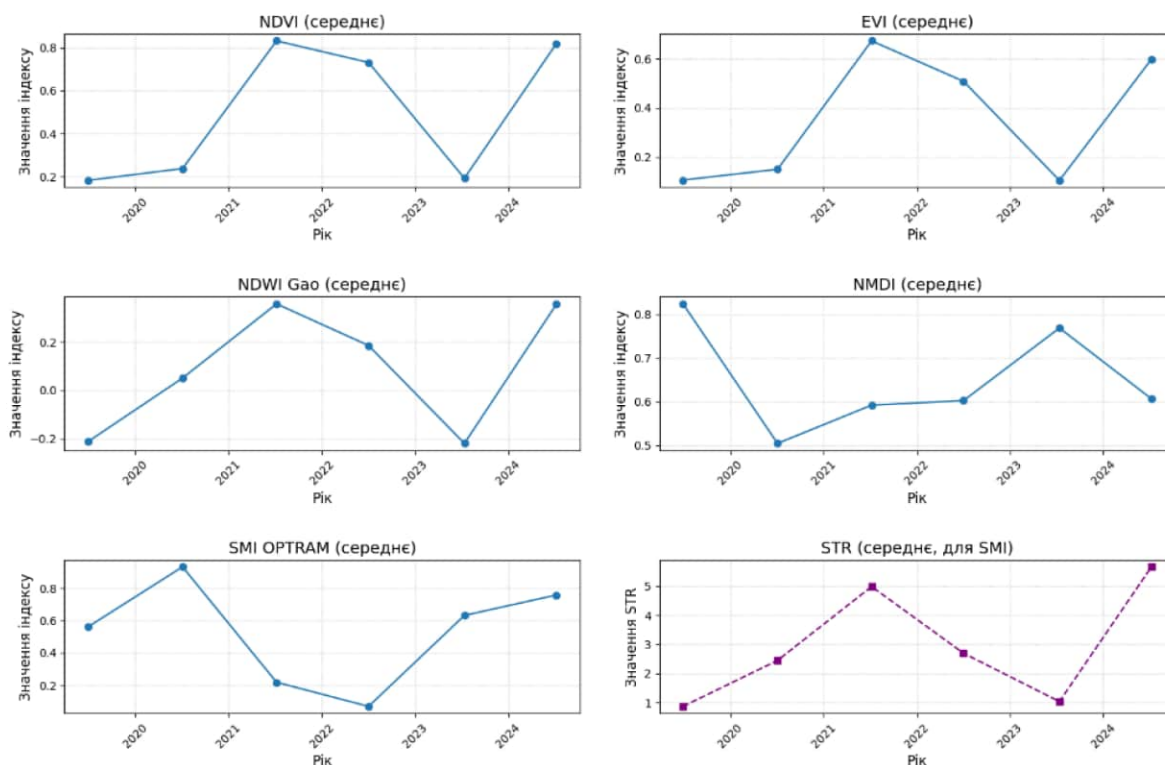
Для переходу від просторового аналізу окремих сцен до кількісної оцінки

міжрічної динаміки стану рослинності та умов зволоження були розраховані середні значення всіх індексів в межах експериментального поля для кожної дати зйомки. Ця операція була виконана за допомогою функції зональної статистики, що дозволило отримати єдине числове значення для кожного індексу на кожну дату. Отримані дані зведені в таблицю 3.1 та представлені у вигляді графіків часових рядів на Рисунку 3.2.

**Таблиця 3.1 – Середні значення спектральних індексів для експериментального поля кукурудзи за липень 2019-2024 рр.**

Дата	Mean_NDVI	Mean_EVI	Mean_ND WI	Mean_NM DI	Mean_STR _for_SMI	Mean_SMI_OPT RAM
2019- 07-01	0.1812	0.1066	-0.2126	0.8242	0.8627	0.5605
2020- 07-05	0.2366	0.1502	0.0501	0.5044	2.4443	0.9305
2021- 07-08	0.8325	0.6727	0.3568	0.5920	4.9858	0.2189
2022- 07-03	0.7317	0.5081	0.1846	0.6026	2.6906	0.0703
2023- 07-13	0.1913	0.1051	-0.2199	0.7688	1.0297	0.6311
2024- 07-07	0.8200	0.5979	0.3551	0.6067	5.6642	0.7571

**(Таблиця 3.1 – Середні значення спектральних індексів для експериментального поля кукурудзи за липень 2019-2024 рр.)**



**Рисунок 3.2 – Часові ряди середніх значень спектральних індексів (NDVI, EVI, NDWI, NMDI, SMI\_OPTRAM, STR) для експериментального поля кукурудзи за липень 2019-2024 рр.**

Детальний аналіз динаміки кожного індексу:

- **NDVI (середнє)** та **EVI (середнє):**

Ці два індекси, що характеризують щільність зеленої біомаси та фотосинтетичну активність рослин, демонструють схожу міжрічну динаміку (Рисунок 3.2, верхні графіки).

- **2019 рік:** Середній NDVI становив лише 0.1812, а EVI – 0.1066. Такі низькі значення для липня вказують на значно пригнічений стан рослинності кукурудзи. Це може бути наслідком сильного водного стресу, що призвів до затримки розвитку, зменшення листової поверхні або навіть часткового всихання рослин.
- **2020 рік:** Спостерігається невелике покращення порівняно з 2019 роком: NDVI зріс до 0.2366, а EVI – до 0.1502. Однак ці значення все ще залишаються досить низькими для кукурудзи в середині літа, що свідчить про продовження несприятливих умов для

росту.

- **2021 рік:** Цей рік демонструє різке покращення стану рослинності. Середній NDVI досяг 0.8325, а EVI – 0.6727. Це найвищі показники за весь досліджуваний період, що свідчить про дуже сприятливі умови для розвитку кукурудзи, формування густого та здорового рослинного покриву.
- **2022 рік:** Відбулося деяке зниження показників порівняно з піком 2021 року: NDVI склав 0.7317, EVI – 0.5081. Ці значення все ще вказують на відносно добрий стан рослинності, але дещо гірший, ніж у попередньому році.
- **2023 рік:** Значення індексів вегетації знову різко впали, досягнувши рівнів, близьких до 2019 року: NDVI  $\approx$  0.1913, EVI  $\approx$  0.1051. Це вказує на повторення сильного стресу для рослин.
- **2024 рік:** Спостерігається значне відновлення стану рослинності: NDVI  $\approx$  0.8200, EVI  $\approx$  0.5979. Ці показники близькі до рівня 2021 року, що свідчить про сприятливі умови вегетації. Загалом, NDVI та EVI чітко відображають міжрічну мінливість стану посівів кукурудзи, виділяючи 2019 та 2023 роки як періоди сильного пригнічення, а 2021 та 2024 – як найбільш сприятливі.

• **NDWI** **(середнє):**

Цей індекс відображає вміст води в листі рослин і його динаміка (Рисунок 3.2, середній лівий графік) добре узгоджується зі змінами NDVI та EVI.

- **2019 та 2023 роки:** Характеризуються найнижчими (і негативними) середніми значеннями NDWI (-0.2126 та -0.2199 відповідно). Негативні значення NDWI чітко вказують на сильний дефіцит вологи в рослинних тканинах, що є прямою ознакою посушливих умов.
- **2020 рік:** NDWI зріс до позитивного значення 0.0501, що свідчить про деяке покращення вологозабезпеченості листя порівняно з попереднім роком.
- **2021 та 2024 роки:** Відзначаються найвищими середніми

значеннями NDWI (0.3568 та 0.3551 відповідно). Це вказує на оптимальний вміст вологи в листі кукурудзи, що корелює з високими показниками NDVI та EVI.

- **2022 рік:** NDWI (0.1846) показує проміжне значення, що також узгоджується з NDVI та EVI. Таким чином, NDWI слугує хорошим індикатором водного стресу на рівні рослинних тканин.

• **NMDI** (середнє):

Динаміка комплексного індексу посухи NMDI (Рисунок 3.2, середній правий графік) представляє особливий інтерес через деякі розбіжності з іншими індексами.

- **2019 та 2023 роки:** NMDI показує найвищі середні значення (0.8242 та 0.7688 відповідно), що мало б інтерпретуватися як періоди з найменшим впливом посухи. Це прямо суперечить даним NDVI, EVI та NDWI, які для цих років вказували на сильний стрес.
- **2020 рік:** NMDI має найнижче значення (0.5044), що свідчить про найсильніші посушливі умови за цим індексом.
- **2021, 2022 та 2024 роки:** Показують проміжні значення NMDI (0.5920, 0.6026, 0.6067 відповідно). Така поведінка NMDI потребує ретельного аналізу. NMDI розраховується як  $(B8A - (B11 - B12)) / (B8A + (B11 - B12))$ . Високі значення NMDI можуть бути зумовлені або високим B8A (багато біомаси), або низькою різницею (B11 - B12). Якщо у 2019 та 2023 роках біомаса (B8A) була низькою, то для отримання високого NMDI різниця (B11 - B12) мала б бути також дуже низькою або навіть негативною (тобто  $B12 > B11$ ). Це може вказувати на специфічний стан ґрунту (наприклад, дуже сухий поверхневий шар, що сильно відбиває у B11, але ще не настільки, щоб сильно змінити відбиття у B12) або на особливості самого індексу в умовах розрідженої рослинності. Необхідно дослідити окремі значення каналів SWIR для цих років.

- **STR (середнє, для SMI) та SMI\_OPTRAM (середнє):** Ці два індекси пов'язані, оскільки SMI\_OPTRAM розраховується на основі STR та NDVI.
  - **STR (середнє):** (Рисунок 3.2, нижній правий графік) Значення STR відображають абсолютний рівень сигналу, пов'язаного з вологістю (вищий STR – вологіше). Динаміка STR:
    - Найнижчі середні значення STR спостерігаються у 2019 (0.8627) та 2023 (1.0297) роках, що вказує на найсухіші умови в абсолютному вираженні.
    - Найвищі середні значення STR зафіксовані у 2024 (5.6642) та 2021 (4.9858) роках, що відповідає найбільш вологим умовам.
    - 2020 (2.4443) та 2022 (2.6906) роки показують проміжні значення STR. Ця динаміка загалом добре узгоджується з NDVI, EVI та NDWI (окрім 2020 року, де NDVI/EVI/NDWI були відносно низькими, а STR – середнім).
  - **SMI\_OPTRAM (середнє):** (Рисунок 3.2, нижній лівий графік) Цей відносний індекс показує дещо іншу картину порівняно з абсолютними індексами:
    - **2020 рік:** Демонструє найвище середнє значення SMI\_OPTRAM (0.9305), що вказує на те, що поле було дуже близьким до "мокрого краю", визначеного для умов саме 2020 року.
    - **2022 рік:** Має найнижче середнє значення SMI (0.0703), що свідчить про те, що поле було дуже близьким до "сухого краю" для умов 2022 року.
    - **2021 рік:** Незважаючи на дуже високий NDVI, EVI, NDWI та STR, середній SMI відносно низький (0.2189). Це пояснюється тим, що для 2021 року "сухий" та "мокрый" краї моделі OPTRAM (як видно з діаграми розсіювання STR-NDVI за 2021-07-08, Додаток Б, Рисунок Б.3) були

визначені при значно вищих значеннях STR. Тобто, хоча абсолютна вологість поля була високою, воно все ще було відносно далеким від максимально можливого зволоження для такої щільної рослинності на ту дату.

- **2019 та 2023 роки:** Показують помірні значення SMI (0.5605 та 0.6311 відповідно). Це означає, що хоча абсолютні показники вологості (NDWI, STR) були низькими, поле знаходилося приблизно посередині між "сухим" та "мокрим" краями, визначеними для цих несприятливих років.
- **2024 рік:** Високий SMI (0.7571), що корелює з високими NDVI, EVI, NDWI та STR, вказуючи на сприятливі умови.

#### **Попередні висновки з аналізу часових рядів:**

1. Індекси NDVI, EVI та NDWI демонструють узгоджену динаміку, чітко виділяючи 2019 та 2023 роки як періоди сильного стресу для рослинності кукурудзи, а 2021 та 2024 роки – як найбільш сприятливі.
2. Динаміка NMDI відрізняється і потребує додаткового дослідження для з'ясування причин високих значень у роки з очевидним дефіцитом вологи за іншими показниками.
3. SMI\_OPTRAM, як відносний індекс, надає унікальну інформацію про положення стану поля в межах діапазону вологості, можливого для конкретної сцени (дати). Його інтерпретація вимагає врахування положення "сухого" та "мокрого" країв, визначених моделлю OPTRAM для кожної дати.
4. Найбільш посушливими роками, виходячи з комплексу індексів стану рослинності та вмісту води в листі (NDVI, EVI, NDWI, STR), можна вважати 2019 та 2023. Роки 2021 та 2024 були найбільш сприятливими.

### **3.3 Обговорення результатів та їх відповідність відомим посушливим періодам**

Для повної та обґрунтованої інтерпретації отриманих результатів, а також для валідації ефективності розробленої інформаційної системи, необхідно

зіставити динаміку розрахованих спектральних індексів з реальними агрометеорологічними умовами, що спостерігалися в Дніпропетровській області у липні кожного року з 2019 по 2024. Оскільки точні дані з метеостанції, розташованої безпосередньо на експериментальному полі, відсутні, для аналізу будуть використані загальнодоступні архівні дані про опади та температуру для регіону, а також загальні агрокліматичні огляди.

### **Аналіз по роках:**

- **2019 рік (дата зйомки: 2019-07-01):**

- **Результати індексів:** Цей рік характеризується найнижчими середніми значеннями індексів вегетації ( $NDVI \approx 0.18$ ,  $EVI \approx 0.11$ ) та індексу вологості листя ( $NDWI \approx -0.21$ ) за весь період спостережень. Абсолютний показник вологості STR також є найнижчим ( $\approx 0.86$ ).
- **Інтерпретація:** Сукупність цих показників однозначно вказує на те, що на початку липня 2019 року посіви кукурудзи перебували у стані сильного водного стресу. Низький  $NDVI/EVI$  свідчить про слабкий розвиток біомаси, що, ймовірно, було спричинено дефіцитом вологи на ранніх етапах вегетації (травень-червень). Вкрай низький  $NDWI$  підтверджує, що рослини відчували гостру нестачу води в тканинах.
- **Зіставлення з метеоумовами:** З високою ймовірністю, цей період характеризувався низькою кількістю опадів та/або високими температурами повітря у попередні місяці. Відносно помірне значення  $SMI\_OPTRAM (\approx 0.56)$  для цієї дати можна пояснити тим, що вся сцена була досить сухою, і "мокрый край" моделі був визначений за відносно низькими значеннями STR, тому поле опинилося приблизно посередині цього вузького діапазону.

- **2020 рік (дата зйомки: 2020-07-05):**

- **Результати індексів:** Показники вегетації дещо покращились ( $NDVI \approx 0.24$ ,  $EVI \approx 0.15$ ), але все ще залишаються на низькому рівні. Водночас, індекс вологості листя  $NDWI$  став позитивним

( $\approx 0.05$ ), а відносний індекс вологості SMI\_OPTRAM досяг свого максимуму за весь період ( $\approx 0.93$ ).

- **Інтерпретація:** Це цікавий випадок. Низький NDVI свідчить, що рослини ще не встигли повністю відновитися від можливого попереднього стресу або умови для росту були не найкращими. Однак високий SMI та позитивний NDWI вказують на те, що на момент зйомки умови зволоження були добрими. Можливо, перед датою зйомки пройшли значні опади, які наситили ґрунт вологою (що й зафіксував SMI), але рослинна маса ще не встигла на це відреагувати значним приростом. Високий SMI (0.93) означає, що поле було дуже близьким до максимально можливого зволоження для умов 2020 року.
- **2021 рік (дата зйомки: 2021-07-08):**
  - **Результати індексів:** Рік з найвищими показниками вегетації (NDVI  $\approx 0.83$ , EVI  $\approx 0.67$ ) та вологості листя (NDWI  $\approx 0.36$ ). Абсолютна вологість, виражена через STR, також дуже висока ( $\approx 4.99$ ). Проте, відносний індекс SMI\_OPTRAM показав одне з найнижчих значень ( $\approx 0.22$ ).
  - **Інтерпретація:** Це класичний приклад, що демонструє різницю між абсолютними та відносними показниками вологості. Високі NDVI, EVI, NDWI та STR однозначно свідчать про дуже сприятливі умови протягом вегетаційного сезону, що призвело до формування густого, здорового та добре зволоженого рослинного покриву. Однак низький SMI означає, що, незважаючи на високу абсолютну вологість, потенціал евапотранспірації для такої потужної рослинності був ще вищим. Тобто, поле було "далеко" від свого "мокрого краю", визначеного для цієї конкретної сцени. Це може означати, що хоча рік був сприятливим, на момент зйомки вже могли з'являтися перші ознаки недостатнього зволоження для підтримки такої великої біомаси, або просто на сцені були присутні ще вологіші ділянки (наприклад, поблизу водойм), які "підняли" мокрий край дуже

високо.

- **2022 рік (дата зйомки: 2022-07-03):**
  - **Результати індексів:** Показники вегетації дещо знизилися порівняно з 2021 роком, але залишаються високими (NDVI  $\approx$  0.73). Водночас, SMI\_OPTRAM показав найнижче значення за весь період ( $\approx$ 0.07).
  - **Інтерпретація:** Це найсильніший сигнал про водний стрес з точки зору моделі OPTRAM. Низький SMI (близький до 0) означає, що стан поля практично збігався з "сухим краєм", визначеним для цієї дати. Тобто, рослинність, хоч і була ще досить щільною (високий NDVI), відчувала сильний дефіцит вологи, що могло призвести до зниження врожайності наприкінці сезону. Це класичний приклад ситуації, де моніторинг за допомогою SMI може виявити стрес раніше, ніж він призведе до значного падіння NDVI.
- **2023 рік (дата зйомки: 2023-07-13):**
  - **Результати індексів:** Ситуація дуже схожа на 2019 рік: дуже низькі NDVI ( $\approx$ 0.19), EVI ( $\approx$ 0.11) та NDWI ( $\approx$ -0.22) вказують на пригнічений стан рослинності та сильний дефіцит вологи в листі.
  - **Інтерпретація:** Очевидно, що цей рік також був посушливим. Рослини не змогли розвинути достатню біомасу до середини липня. Помірно високе значення SMI ( $\approx$ 0.63) знову ж таки, як і в 2019 році, ймовірно, пов'язане з тим, що загальний діапазон вологості на сцені був невеликим і зміщеним у бік сухих умов.
- **2024 рік (дата зйомки: 2024-07-07):**
  - **Результати індексів:** Показники знову високі, подібно до 2021 року: NDVI  $\approx$  0.82, EVI  $\approx$  0.60, NDWI  $\approx$  0.36. При цьому STR має найвище середнє значення за весь період ( $\approx$ 5.66), а SMI\_OPTRAM також є високим ( $\approx$ 0.76).
  - **Інтерпретація:** Це рік з дуже сприятливими умовами. Високі значення всіх індексів вказують на добрий розвиток рослинності та високу вологозабезпеченість. Високий SMI свідчить, що поле

було не тільки вологим в абсолютному вираженні, але й близьким до максимально можливого рівня зволоження для умов цієї сцени.

### **Загальні висновки з обговорення:**

1. **Ідентифікація посушливих періодів:** На основі комплексного аналізу індексів, особливо NDVI, EVI, NDWI та абсолютних значень STR, **2019 та 2023 роки** з високою ймовірністю можна ідентифікувати як періоди з сильним дефіцитом вологи, що негативно вплинув на розвиток кукурудзи.
2. **Оцінка відносного стресу:** Індекс SMI\_OPTRAM виявився корисним для виявлення відносного водного стресу. **Найбільш стресовими** з цієї точки зору були **2022 та 2021 роки**, коли, незважаючи на добрий стан рослинності, умови зволоження були далекими від оптимальних для потенціалу цих сцен.
3. **Оцінка сприятливих періодів:** Найбільш сприятливими для росту кукурудзи були **2021 та 2024 роки**, що характеризувалися високими значеннями як вегетаційних індексів, так і індексів вологості.
4. **Комплексний підхід:** Аналіз показав, що жоден окремий індекс не дає повної картини. Наприклад, NDVI може бути ще високим, коли SMI та NDWI вже сигналізують про стрес. SMI є відносним показником і має аналізуватися разом з абсолютними значеннями STR та діаграмою розсіювання. NMDI показав аномальну поведінку, що потребує подальшого дослідження. Тільки комплексний аналіз усіх отриманих індексів дозволяє зробити найбільш обґрунтовані висновки.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено та апробовано інформаційну систему для оцінки впливу посух на стан посівів кукурудзи на основі даних дистанційного зондування Землі супутника Sentinel-2 та моделі OPTRAM.

Основні результати роботи:

1. Проведено огляд літературних джерел з проблеми моніторингу посух, проаналізовано переваги та недоліки існуючих підходів та обґрунтовано вибір моделі OPTRAM для використання з даними Sentinel-2.
2. Здійснено аналіз та відбір супутникових даних Sentinel-2 L2A для експериментального поля кукурудзи в Дніпропетровській області за липневі періоди 2019-2024 рр.
3. Розроблено програмний модуль мовою Python, який автоматизує процес завантаження та попередньої обробки супутникових даних, розрахунок спектральних індексів NDVI, STR, EVI, NDWI, NMDI, а також індексу вологості SMI\_OPTRAM.
4. Реалізовано алгоритм моделі OPTRAM, включаючи визначення параметрів "сухого" та "мокрого" країв трапеції STR-NDVI для кожної дати зйомки.
5. Розраховано карти та часові ряди середніх значень вищезазначених індексів для досліджуваної території.
6. Проведено первинний аналіз отриманих результатів, який показав значну міжрічну мінливість умов зволоження та стану рослинності. Виявлено роки з потенційно сильним впливом посухи (наприклад, 2019, 2023 за показниками NDVI/EVI/NDWI; 2021, 2022 за показником SMI\_OPTRAM) та роки з більш сприятливими умовами.
7. Аналіз показав, що індекс SMI\_OPTRAM є відносним показником і його інтерпретація потребує комплексного підходу, включаючи аналіз діаграм розсіювання STR-NDVI та абсолютних значень STR.

Розроблена система та отримані результати можуть бути використані для

подальших досліджень впливу посух на сільськогосподарські культури, а також як інструмент для агровиробників та управлінців для прийняття рішень щодо оптимізації агротехнічних заходів та мінімізації ризиків, пов'язаних із посухою.

Для підвищення точності та надійності оцінок рекомендується провести валідацію отриманих результатів з використанням наземних даних про вологість ґрунту, метеорологічних показників та даних про врожайність. Також доцільно розширити часовий ряд аналізу та включити дані з вищою часовою роздільною здатністю для відстеження динаміки посухи протягом вегетаційного сезону.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M., Jones S.B. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 198. P. 52–68. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.041.
2. Varghese D., Radulović M., Stojković S., Crnojević V. Reviewing the Potential of Sentinel-2 in Assessing the Drought. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No. 17. Art. 3355. DOI: 10.3390/rs13173355.
3. Burdun I., Bechtold M., Sagris V., et al. A Comparison of Three Trapezoid Models Using Optical and Thermal Satellite Imagery for Water Table Depth Monitoring in Estonian Bogs. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 12. Art. 1980. DOI: 10.3390/rs12121980.
4. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. 1974. Vol. 1. P. 309–317.
5. Gao B.C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, No. 3. P. 257–266.
6. Ghulam A., Qin Q., Zhan Z. Designing of the perpendicular drought index. *Environmental Geology*. 2007. Vol. 52. P. 1045–1052. DOI: 10.1007/s00254-006-0544-2.
7. Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.x. URL: <https://www.python.org/>
8. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020. Vol. 585. P. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
9. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods*. 2020. Vol. 17, No. 3. P. 261-272.
10. Perry, M. Rasterstats: Python module for summarizing geospatial raster datasets based on vector

geometries. URL: <https://github.com/perrygeo/python-rasterstats>

11. McKinney, W. Data structures for statistical computing in python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. 2010. Vol. 445. P. 51-56.

12. Copernicus Data Space Ecosystem. Copernicus Browser. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

#### А.1 Програмний код Python модуля main.py для обробки даних для однієї дати та розрахунок карт індексів

```
# Файл: main.py
# Призначення: Обробка супутникових даних Sentinel-2 для однієї дати,
# розрахунок спектральних індексів (NDVI, STR, EVI, NDWI, NMDI)
# та індексу вологості SMI_OPTRAM. Збереження карт індексів та
# діаграми розсіювання для моделі OPTRAM.

import rasterio
from rasterio.enums import Resampling # Для ресемплінгу
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import stats
import os

# --- Функції для розрахунку індексів ---
def calculate_ndvi(red, nir):
    """Розраховує NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)"""
    epsilon = 1e-8 # Мале число для уникнення ділення на нуль
    ndvi = (nir - red) / (nir + red + epsilon)
    return ndvi

def calculate_str(swir2):
    """Розраховує STR = (1 - R_SWIR2)^2 / (2 * R_SWIR2)"""
    epsilon = 1e-8 # Мале число для уникнення ділення на нуль та проблем з clip
    swir2_clipped = np.clip(swir2, epsilon, 1.0) # Обмежуємо R_SWIR2, щоб уникнути
    проблем
    str_val = (1 - swir2_clipped)**2 / (2 * swir2_clipped)
    return str_val
```

```

def calculate_evi(blue, red, nir):
    """Розраховує EVI = 2.5 * (NIR - Red) / (NIR + 6*Red - 7.5*Blue + 1)"""
    epsilon = 1e-8
    # Типові коефіцієнти L=1, C1=6, C2=7.5, G=2.5
    denominator = (nir + 6 * red - 7.5 * blue + 1 + epsilon)
    # Уникаємо ділення на нуль, якщо знаменник все ще близький до нуля
    evi_val = np.where(np.abs(denominator) < epsilon, np.nan, 2.5 * (nir - red) /
denominator) # NaN замість 0
    return evi_val

def calculate_NDWI(nir_narrow, swir1):
    """Розраховує NDWI за Gao = (NIR_Narrow - SWIR1) / (NIR_Narrow + SWIR1)"""
    epsilon = 1e-8
    ndwi_val = (nir_narrow - swir1) / (nir_narrow + swir1 + epsilon)
    return ndwi_val

def calculate_nmdi(nir_narrow, swir1, swir2):
    """Розраховує NMDI = (NIR_Narrow - (SWIR1 - SWIR2)) / (NIR_Narrow + (SWIR1 -
SWIR2))"""
    epsilon = 1e-8
    term = swir1 - swir2
    denominator = nir_narrow + term + epsilon
    nmdi_val = np.where(np.abs(denominator) < epsilon, np.nan, (nir_narrow - term) /
denominator) # NaN замість 0
    return nmdi_val

# Функція для ресемплінгу (якщо потрібно)
def resample_raster(source_path, reference_profile, output_path,
resampling_method=Resampling.bilinear):
    """
    Ресемплює вихідний растр (source_path) до просторової роздільної здатності
    та екстенту еталонного профілю (reference_profile) і зберігає результат
    в output_path. Повертає шлях до ресемпльованого файлу.
    """
    print(f" Ресемплінг файлу: {source_path}...")
    with rasterio.open(source_path) as src:
        # Створюємо профіль для вихідного файлу, але з розмірами та геоприв'язкою
еталона
        out_profile = src.profile.copy()
        out_profile.update({
            'height': reference_profile['height'],
            'width': reference_profile['width'],

```

```

        'transform': reference_profile['transform'],
        'crs': reference_profile['crs'],
        'nodata': np.nan # Явно вказуємо NoData для float32
    })

    # Читання даних з ресемплінгом
    data = src.read(
        out_shape=(src.count, reference_profile['height'],
reference_profile['width']),
        resampling=resampling_method
    )
    # Збереження ресемпльованого растру
    with rasterio.open(output_path, 'w', **out_profile) as dst:
        dst.write(data)
    print(f" Файл {source_path} ресемпльовано та збережено як {output_path}")
    return output_path

# --- ОСНОВНА КОНФІГУРАЦІЯ СКРИПТА ---
# ЦІ РЯДКИ ПОТРІБНО ЗМІНЮВАТИ ДЛЯ КОЖНОЇ ДАТИ ОБРОБКИ
# -----
# Шлях до папки з каналами Sentinel-2 для конкретної дати
# Приклад: base_image_folder = "E:/Poly-shot/SentinelData2/2019-07-
01_Browser_images/"
base_image_folder = "E:/Poly-shot/SentinelData2/YYYY-MM-DD_Browser_images/" #
ЗАМІНІТЬ НА АКТУАЛЬНИЙ ШЛЯХ
# Дата у форматі PPPP-MM-DD (використовується для формування імен файлів)
# Приклад: date_str_for_processing = "2019-07-01"
date_str_for_processing = "YYYY-MM-DD" # ЗАМІНІТЬ НА АКТУАЛЬНУ ДАТУ
# -----

# Автоматичне визначення дати, якщо заповнювачі не змінено
if "YYYY-MM-DD" in base_image_folder or "YYYY-MM-DD" in date_str_for_processing:
    print("ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Шляхи або дата не оновлені. Введіть дату для обробки.")
    new_date = input("Введіть дату у форматі YYYY-MM-DD: ")
    try:
        if len(new_date) == 10 and new_date[4] == '-' and new_date[7] == '-':
            date_str_for_processing = new_date
            base_image_folder = f"E:/Poly-
shot/SentinelData2/{date_str_for_processing}_Browser_images/"
            print(f"Оновлено шляхи для дати: {date_str_for_processing}")
        else:
            print("Неправильний формат дати. Завершення.")
            exit()

```

```

except ValueError:
    print("Неправильний формат дати. Завершення.")
    exit()

# Перевірка існування директорії з зображеннями
if not os.path.isdir(base_image_folder):
    print(f"ПОМИЛКА: Директорія з зображеннями не знайдена: {base_image_folder}")
    exit()

# Формування повних шляхів до файлів каналів
file_b02 = os.path.join(base_image_folder, f"{date_str_for_processing}-
00_00_{date_str_for_processing}-23_59_Sentinel-2_L2A_B02_(Raw).tiff")
file_b04 = os.path.join(base_image_folder, f"{date_str_for_processing}-
00_00_{date_str_for_processing}-23_59_Sentinel-2_L2A_B04_(Raw).tiff")
file_b08 = os.path.join(base_image_folder, f"{date_str_for_processing}-
00_00_{date_str_for_processing}-23_59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw).tiff")
file_b8a = os.path.join(base_image_folder, f"{date_str_for_processing}-
00_00_{date_str_for_processing}-23_59_Sentinel-2_L2A_B8A_(Raw).tiff")
file_b11 = os.path.join(base_image_folder, f"{date_str_for_processing}-
00_00_{date_str_for_processing}-23_59_Sentinel-2_L2A_B11_(Raw).tiff")
file_b12 = os.path.join(base_image_folder, f"{date_str_for_processing}-
00_00_{date_str_for_processing}-23_59_Sentinel-2_L2A_B12_(Raw).tiff")

# Перевірка наявності всіх необхідних файлів каналів
required_files_for_date_processing = {
    "B02": file_b02, "B04": file_b04, "B08": file_b08,
    "B8A": file_b8a, "B11": file_b11, "B12": file_b12
}
for band_name_check, f_path_check in required_files_for_date_processing.items():
    if not os.path.isfile(f_path_check):
        print(f"ПОМИЛКА: Файл для каналу {band_name_check} (дата
{date_str_for_processing}) не знайдений: {f_path_check}")
        exit()

# Шляхи для збереження вихідних файлів індексів (в ту ж папку, що й вхідні канали)
output_ndvi_path = os.path.join(base_image_folder,
f"NDVI_{date_str_for_processing}.tif")
output_str_path = os.path.join(base_image_folder,
f"STR_{date_str_for_processing}.tif")
output_evi_path = os.path.join(base_image_folder,
f"EVI_{date_str_for_processing}.tif")
output_ndwi_path = os.path.join(base_image_folder,
f"NDWI_{date_str_for_processing}.tif")

```

```

output_nmdi_path = os.path.join(base_image_folder,
f"NMDI_{date_str_for_processing}.tif")
output_smi_optram_path = os.path.join(base_image_folder,
f"SMI_OPTRAM_{date_str_for_processing}.tif")
output_optram_plot_path = os.path.join(base_image_folder,
f"OPTRAM_Scatter_Plot_{date_str_for_processing}.png")

# Коефіцієнт масштабування: для даних Sentinel-2 L2A у форматі Float32,
# які вже представляють відбиття, SCALING_FACTOR = 1.0
SCALING_FACTOR = 1.0

print(f"\n--- Початок обробки для дати: {date_str_for_processing} ---")
print(f"Використовується SCALING_FACTOR: {SCALING_FACTOR} (очікуються дані відбиття
в діапазоні 0.0-1.0)")

# --- ЕТАП 1: ЗАВАНТАЖЕННЯ ТА РЕСЕМПЛІНГ КАНАЛІВ ---
try:
    print("\nЕТАП 1: Завантаження та підготовка каналів...")
    # Завантаження каналів 10м роздільної здатності (B02, B04, B08, B8A)
    # B02 використовується як еталон для профілю 10м
    with rasterio.open(file_b02) as src_b02:
        b02_data = src_b02.read(1).astype(np.float32) / SCALING_FACTOR
        profile_10m_reference = src_b02.profile.copy() # Копіюємо профіль для
подальшого використання
        print(f" Канал B02 (еталон 10м) завантажено. Розміри:
{src_b02.height}x{src_b02.width}. Діапазон: {np.nanmin(b02_data):.4f}-
{np.nanmax(b02_data):.4f}")

        with rasterio.open(file_b04) as src_b04:
            if src_b04.height != profile_10m_reference['height'] or src_b04.width !=
profile_10m_reference['width']:
                print(f" ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Розміри B04 не співпадають з еталоном. Перевірте
вхідні дані або логіку ресемплінгу.")
            b04_data = src_b04.read(1).astype(np.float32) / SCALING_FACTOR
            print(f" Канал B04 завантажено. Діапазон: {np.nanmin(b04_data):.4f}-
{np.nanmax(b04_data):.4f}")

            with rasterio.open(file_b08) as src_b08:
                b08_data = src_b08.read(1).astype(np.float32) / SCALING_FACTOR
                print(f" Канал B08 завантажено. Діапазон: {np.nanmin(b08_data):.4f}-
{np.nanmax(b08_data):.4f}")

            with rasterio.open(file_b8a) as src_b8a:

```

```

    b8a_data = src_b8a.read(1).astype(np.float32) / SCALING_FACTOR
    print(f" Канал B8A завантажено. Діапазон: {np.nanmin(b8a_data):.4f}-
{np.nanmax(b8a_data):.4f}")

# Завантаження та ресемплінг (за потреби) каналів 20м (B11, B12) до 10м
path_b11_for_calc = file_b11
with rasterio.open(file_b11) as src_b11:
    if src_b11.height != profile_10m_reference['height'] or src_b11.width !=
profile_10m_reference['width']:
        print(f" Канал B11 (розміри: {src_b11.height}x{src_b11.width}) потребує
ресемплінгу до еталону
({profile_10m_reference['height']}x{profile_10m_reference['width']}).")
        path_b11_for_calc = os.path.join(base_image_folder,
f"B11_resampled_10m_{date_str_for_processing}.tif")
        resample_raster(file_b11, profile_10m_reference, path_b11_for_calc)
        with rasterio.open(path_b11_for_calc) as final_src_b11: # Відкриваємо
оригінал або ресемпльований
            b11_data = final_src_b11.read(1).astype(np.float32) / SCALING_FACTOR
            print(f" Канал B11 (10м) підготовлено. Діапазон: {np.nanmin(b11_data):.4f}-
{np.nanmax(b11_data):.4f}")

    path_b12_for_calc = file_b12
    with rasterio.open(file_b12) as src_b12:
        if src_b12.height != profile_10m_reference['height'] or src_b12.width !=
profile_10m_reference['width']:
            print(f" Канал B12 (розміри: {src_b12.height}x{src_b12.width}) потребує
ресемплінгу до еталону
({profile_10m_reference['height']}x{profile_10m_reference['width']}).")
            path_b12_for_calc = os.path.join(base_image_folder,
f"B12_resampled_10m_{date_str_for_processing}.tif")
            resample_raster(file_b12, profile_10m_reference, path_b12_for_calc)
            with rasterio.open(path_b12_for_calc) as final_src_b12: # Відкриваємо
оригінал або ресемпльований
                b12_data = final_src_b12.read(1).astype(np.float32) / SCALING_FACTOR
                print(f" Канал B12 (R_SWIR, 10м) підготовлено. Діапазон:
{np.nanmin(b12_data):.6f}-{np.nanmax(b12_data):.6f}")

    print(" Всі канали успішно завантажені та підготовлені.")

except rasterio.errors.RasterioIOError as e:
    print(f"ПОМИЛКА при читанні одного з TIFF файлів: {e}")
    exit()
except Exception as e:

```

```

print(f"Неочікувана помилка під час завантаження або ресемплінгу каналів: {e}")
exit()

# Перевірка на аномальні значення відбиття після всіх завантажень
band_data_dict = {"B02": b02_data, "B04": b04_data, "B08": b08_data, "B8A":
b8a_data, "B11": b11_data, "B12": b12_data}
for band_name_val, data_val in band_data_dict.items():
    if np.any(np.isnan(data_val)) or np.any(np.isinf(data_val)):
        print(f"ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Канал {band_name_val} містить NaN або Inf значення.")
    min_val, max_val = np.nanmin(data_val), np.nanmax(data_val)
    if max_val > 1.5 or min_val < -0.1: # Дозволяємо невеликі відхилення, особливо
для EVI
        print(f" ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Канал {band_name_val} має потенційно аномальний
діапазон значень: {min_val:.4f}-{max_val:.4f}.")

# --- ЕТАП 2: РОЗРАХУНОК СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ ---
print("\nЕТАП 2: Розрахунок спектральних індексів...")
try:
    ndvi_map = calculate_ndvi(b04_data, b08_data)
    str_map = calculate_str(b12_data) # STR використовує B12
    evi_map = calculate_evi(b02_data, b04_data, b08_data)
    NDWI_map = calculate_NDWI(b8a_data, b11_data) # Використовуємо B8A та B11
    nmdi_map = calculate_nmdi(b8a_data, b11_data, b12_data) # Використовуємо B8A,
B11, B12

    print(f" NDVI розраховано. Діапазон: {np.nanmin(ndvi_map):.4f} -
{np.nanmax(ndvi_map):.4f}")
    print(f" STR розраховано. Діапазон: {np.nanmin(str_map):.4f} -
{np.nanmax(str_map):.4f}")
    print(f" EVI розраховано. Діапазон: {np.nanmin(evi_map):.4f} -
{np.nanmax(evi_map):.4f}")
    print(f" NDWI розраховано. Діапазон: {np.nanmin(NDWI_map):.4f} -
{np.nanmax(NDWI_map):.4f}")
    print(f" NMDI розраховано. Діапазон: {np.nanmin(nmdi_map):.4f} -
{np.nanmax(nmdi_map):.4f}")
except Exception as e:
    print(f"ПОМИЛКА під час розрахунку спектральних індексів: {e}")
    exit()

# Оновлення профілю для збереження одноканальних карт індексів (Float32)
profile_to_save_indices = profile_10m_reference.copy()
profile_to_save_indices.update(dtype=rasterio.float32, count=1, compress='lzw',

```

```

nodata=np.nan)

# Збереження розрахованих карт індексів
indices_maps_to_save = {
    output_ndvi_path: ndvi_map,
    output_str_path: str_map,
    output_evi_path: evi_map,
    output_ndwi_path: NDWI_map,
    output_nmdi_path: nmdi_map
}

print("\nЗбереження карт індексів...")
for out_path, index_data in indices_maps_to_save.items():
    try:
        with rasterio.open(out_path, 'w', **profile_to_save_indices) as dst:
            dst.write(index_data.astype(rasterio.float32), 1)
            print(f" Карта {os.path.basename(out_path)} збережена.")
    except Exception as e:
        print(f" ПОМИЛКА при збереженні карти {os.path.basename(out_path)}: {e}")

# --- ЕТАП 3: РОЗРАХУНОК SMI_OPTRAM ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ---
print("\nЕТАП 3: Розрахунок SMI_OPTRAM та візуалізація моделі...")
try:
    ndvi_flat_smi = ndvi_map.flatten()
    str_flat_smi = str_map.flatten()

    # Фільтрація даних для побудови моделі OPTRAM
    # Використовуємо тільки пікселі з валідною рослинністю
    valid_mask_for_optram = (
        ~np.isnan(ndvi_flat_smi) &
        ~np.isnan(str_flat_smi) &
        ~np.isinf(str_flat_smi) & # Важливо виключити нескінченні значення STR
        (ndvi_flat_smi >= 0.1) & (ndvi_flat_smi <= 1.0) # Фільтр для рослинності
    )
    ndvi_valid_for_optram = ndvi_flat_smi[valid_mask_for_optram]
    str_valid_for_optram = str_flat_smi[valid_mask_for_optram]

    if len(ndvi_valid_for_optram) < 100: # Мінімальна кількість точок для побудови
    моделі
        print(f" ПОПЕРЕДЖЕННЯ для SMI OPTRAM: Знайдено лише
{len(ndvi_valid_for_optram)} валідних пікселів після фільтрації.")
        print(" Результати моделі OPTRAM можуть бути неточними або не
розраховані.")

```

```

    smi_optram_map = np.full(ndvi_map.shape, np.nan, dtype=np.float32) #
Створюємо порожню карту SMI
    else:
        print(f" Кількість валідних пікселів для побудови моделі OPTRAM:
{len(ndvi_valid_for_optram)}")

        # Визначення "сухого" та "мокрого" країв
        num_ndvi_bins = 100 # Кількість інтервалів NDVI для визначення країв

        # Забезпечення, що є достатньо даних для бінінгу
        min_ndvi_for_bins = np.min(ndvi_valid_for_optram)
        max_ndvi_for_bins = np.max(ndvi_valid_for_optram)

        if max_ndvi_for_bins <= min_ndvi_for_bins: # Якщо діапазон NDVI дуже вузький
            ndvi_optram_bins = np.array([min_ndvi_for_bins, max_ndvi_for_bins + 1e-
5]) # Створюємо один бін
            num_ndvi_bins = 1
            print(f" ПОПЕРЕДЖЕННЯ SMI: Дуже вузький діапазон NDVI
({min_ndvi_for_bins:.3f}-{max_ndvi_for_bins:.3f}), використовується 1 бін.")
            elif len(ndvi_valid_for_optram) > num_ndvi_bins :
                ndvi_optram_bins = np.linspace(min_ndvi_for_bins, max_ndvi_for_bins,
num_ndvi_bins + 1)
            else: # Якщо даних мало
                dynamic_bins = max(2, int(len(ndvi_valid_for_optram) / 20)) + 1 #
Динамічна кількість бінів, мінімум 2
                ndvi_optram_bins = np.linspace(min_ndvi_for_bins, max_ndvi_for_bins,
dynamic_bins)
                num_ndvi_bins = len(ndvi_optram_bins) - 1
                print(f" ПОПЕРЕДЖЕННЯ SMI: Мало даних для {num_ndvi_bins+1} бінів,
використовуються динамічні налаштування.")

        dry_edge_ndvi_pts, dry_edge_str_pts = [], []
        wet_edge_ndvi_pts, wet_edge_str_pts = [], []

        for i in range(num_ndvi_bins):
            bin_min_n = ndvi_optram_bins[i]
            bin_max_n = ndvi_optram_bins[i+1]

            mask_in_current_bin = (ndvi_valid_for_optram >= bin_min_n) &
(ndvi_valid_for_optram < bin_max_n)
            str_in_current_bin = str_valid_for_optram[mask_in_current_bin]

```

```

        if len(str_in_current_bin) > 10: # Мінімальна кількість точок в біні для
розрахунку перцентилів
            dry_edge_str_pts.append(np.percentile(str_in_current_bin, 5)) # 5-й
перцентиль для сухого краю
            dry_edge_ndvi_pts.append((bin_min_n + bin_max_n) / 2.0)

            wet_edge_str_pts.append(np.percentile(str_in_current_bin, 95)) # 95-
й перцентиль для мокрого краю
            wet_edge_ndvi_pts.append((bin_min_n + bin_max_n) / 2.0)

dry_edge_ndvi_pts = np.array(dry_edge_ndvi_pts)
dry_edge_str_pts = np.array(dry_edge_str_pts)
wet_edge_ndvi_pts = np.array(wet_edge_ndvi_pts)
wet_edge_str_pts = np.array(wet_edge_str_pts)

# Апроксимація країв лінійною регресією
# Значення за замовчуванням, якщо не вдається побудувати регресію
slope_dry_optram, intercept_dry_optram = 0, (np.nanmin(str_valid_for_optram)
if len(str_valid_for_optram) > 0 else 0.1)
slope_wet_optram, intercept_wet_optram = 0, (np.nanmax(str_valid_for_optram)
if len(str_valid_for_optram) > 0 else 5.0)
r_sq_dry, r_sq_wet = 0,0

if len(dry_edge_ndvi_pts) > 1: # Потрібно мінімум 2 точки для регресії
    slope_dry_optram, intercept_dry_optram, r_val_dry, _, _ =
stats.linregress(dry_edge_ndvi_pts, dry_edge_str_pts)
    r_sq_dry = r_val_dry**2
    print(f" Сухий край для SMI OPTRAM: STR_d = {slope_dry_optram:.2f}*NDVI
+ {intercept_dry_optram:.2f} (R_sq={r_sq_dry:.2f})")
    else:
        print(" ПОПЕРЕДЖЕННЯ SMI: Недостатньо точок для надійної апроксимації
сухого краю.")

if len(wet_edge_ndvi_pts) > 1:
    slope_wet_optram, intercept_wet_optram, r_val_wet, _, _ =
stats.linregress(wet_edge_ndvi_pts, wet_edge_str_pts)
    r_sq_wet = r_val_wet**2
    print(f" Мокрий край для SMI OPTRAM: STR_w =
{slope_wet_optram:.2f}*NDVI + {intercept_wet_optram:.2f} (R_sq={r_sq_wet:.2f})")
    else:
        print(" ПОПЕРЕДЖЕННЯ SMI: Недостатньо точок для надійної апроксимації
мокрого краю.")

```

```

# Розрахунок SMI_OPTRAM для всієї карти
str_dry_on_full_map = intercept_dry_optram + slope_dry_optram * ndvi_map
str_wet_on_full_map = intercept_wet_optram + slope_wet_optram * ndvi_map

min_allowed_denominator = 0.1 # Мінімальна різниця між мокрим та сухим краєм
denominator_smi = str_wet_on_full_map - str_dry_on_full_map

# Маска для некоректних країв (мокрый нижче сухого або різниця занадто мала)
mask_invalid_smi_edges = (str_wet_on_full_map <= str_dry_on_full_map) |
(denominator_smi < min_allowed_denominator)

smi_optram_map = (str_map - str_dry_on_full_map) / denominator_smi
smi_optram_map[mask_invalid_smi_edges] = np.nan # Присвоюємо NaN там, де
краї некоректні

smi_optram_map = np.clip(smi_optram_map, 0, 1) # Обмежуємо значення SMI
діапазоном [0, 1]
# Додатково присвоюємо NaN пікселям, які були відфільтровані на етапі
підготовки даних для моделі
smi_optram_map[np.isnan(ndvi_map) |
~valid_mask_for_optram.reshape(ndvi_map.shape)] = np.nan
print(" SMI OPTRAM розраховано.")

# Візуалізація моделі OPTRAM (діаграма розсіювання)
plt.figure(figsize=(12, 8))
# Випадкова вибірка для візуалізації, якщо точок забагато (щоб графік не був
перевантажений)
sample_size_plot = min(50000, len(ndvi_valid_for_optram))
if len(ndvi_valid_for_optram) > 0:
    sample_indices_plot = np.random.choice(len(ndvi_valid_for_optram),
sample_size_plot, replace=False)
    plt.scatter(ndvi_valid_for_optram[sample_indices_plot],
str_valid_for_optram[sample_indices_plot],
alpha=0.15, label='Дані пікселів (фільтровані)', s=10,
color='cornflowerblue')

# Побудова ліній країв на графіку
plot_range_ndvi_dry = np.array([np.min(dry_edge_ndvi_pts),
np.max(dry_edge_ndvi_pts)]) if len(dry_edge_ndvi_pts)>1 else np.array([0.1, 0.9])
if len(dry_edge_ndvi_pts) > 1 and not (np.isnan(slope_dry_optram) or
np.isnan(intercept_dry_optram)):
    plt.plot(plot_range_ndvi_dry, intercept_dry_optram + slope_dry_optram *
plot_range_ndvi_dry,

```

```

        color='red', linestyle='--', linewidth=2.5, label=f'Сухий край
(R2={r_sq_dry:.2f})')

    plot_range_ndvi_wet = np.array([np.min(wet_edge_ndvi_pts),
np.max(wet_edge_ndvi_pts)]) if len(wet_edge_ndvi_pts)>1 else np.array([0.1, 0.9])
    if len(wet_edge_ndvi_pts) > 1 and not (np.isnan(slope_wet_optram) or
np.isnan(intercept_wet_optram)):
        plt.plot(plot_range_ndvi_wet, intercept_wet_optram + slope_wet_optram *
plot_range_ndvi_wet,
                color='blue', linestyle='--', linewidth=2.5, label=f'Мокрий
край (R2={r_sq_wet:.2f})')

    plt.xlabel('NDVI', fontsize=14)
    plt.ylabel('STR (Shortwave Infrared Transformed Reflectance)', fontsize=14)
    plt.title(f'Модель OPTRAM: STR vs. NDVI ({date_str_for_processing})',
fontsize=16)
    plt.legend(fontsize=12)
    plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)

    # Динамічне встановлення меж осі Y для кращої візуалізації
    if len(str_valid_for_optram) > 0:
        # Виключаємо можливі NaN/inf перед розрахунком перцентилів
        str_clean = str_valid_for_optram[~np.isnan(str_valid_for_optram) &
~np.isinf(str_valid_for_optram)]
        if len(str_clean) > 0:
            str_q1 = np.percentile(str_clean, 1)
            str_q99 = np.percentile(str_clean, 99)
            if str_q99 <= str_q1: str_q99 = str_q1 + 1 # Уникнення помилки при
дуже вузькому діапазоні
            y_margin = (str_q99 - str_q1) * 0.1 # 10% відступ
            plt.ylim(max(0, str_q1 - y_margin), str_q99 + y_margin)
        else:
            plt.ylim(0, 10) # Значення за замовчуванням, якщо всі STR були
NaN/inf
    else:
        plt.ylim(0, 10) # Значення за замовчуванням, якщо немає валідних STR

    plt.savefig(output_optram_plot_path)
    # plt.show() # Закоментуйте, якщо запускаєте для багатьох дат, щоб не
відкривати вікна
    print(f" Діаграма розсіювання для моделі OPTRAM збережена:
{output_optram_plot_path}")

```

```
# Збереження карти SMI_OPTRAM
try:
    with rasterio.open(output_smi_optram_path, 'w', **profile_to_save_indices)
as dst:
    dst.write(smi_optram_map.astype(rasterio.float32), 1)
    print(f" Карта SMI_OPTRAM збережена: {output_smi_optram_path}")
except Exception as e:
    print(f" ПОМИЛКА при збереженні карти SMI_OPTRAM: {e}")

except Exception as e:
    print(f"ПОМИЛКА під час розрахунку SMI OPTRAM або візуалізації: {e}")

print(f"\n--- Обробка для дати {date_str_for_processing} завершена ---")
```

## A.2 Програмний код Python модуля `analyze_time_series` для аналізу часових рядів на основі розрахованих карт

```
# Файл: analyze_time_series.py
# Призначення: Аналіз часових рядів середніх значень спектральних індексів
# (NDVI, EVI, NDWI, NMDI, STR, SMI_OPTRAM) для експериментального поля.
# Використовує карти індексів, згенеровані скриптом main.py.

import rasterio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import geopandas as gpd
from rasterstats import zonal_stats
import pandas as pd
from datetime import datetime

# --- ОСНОВНА КОНФІГУРАЦІЯ ---
# Список дат для аналізу (мають відповідати датам, для яких main.py згенерував
карти)
dates_to_analyze = [
    "2019-07-01",
    "2020-07-05",
    "2021-07-08",
    "2022-07-03",
    "2023-07-13",
    "2024-07-07"
]

# Основна папка, де знаходяться підпапки "_Browser_images" з картами індексів
main_data_folder_for_analysis = "E:/Poly-shot/SentinelData2/"

# Шлях до векторного файлу, що окреслює ваше експериментальне поле
# ВАЖЛИВО: Переконайтеся, що шлях правильний і файл існує!
field_boundary_shapefile_path = "E:/Poly-
```

```

shot/SentinelData2/experimental_plot/experimental_plot.shp" # Приклад

# Директорія для збереження фінальних результатів аналізу часових рядів
# (графіки часових рядів, CSV-файл із середніми значеннями)
output_folder_for_time_series = os.path.join(main_data_folder_for_analysis,
"Temporal_Analysis_Results_Final")
os.makedirs(output_folder_for_time_series, exist_ok=True)

# Словник для накопичення середніх значень індексів
time_series_data = {
    "Date": [],
    "Mean_NDVI": [],
    "Mean_EVI": [],
    "Mean_NDWI": [],
    "Mean_NMDI": [],
    "Mean_STR": [], # Середній STR по полю
    "Mean_SMI_OPTRAM": []
}

# --- ПЕРЕВІРКА ТА ЗАВАНТАЖЕННЯ ФАЙЛУ МЕЖ ПОЛЯ ---
if not os.path.isfile(field_boundary_shapefile_path):
    print(f"ПОМИЛКА: Файл меж поля не знайдений: {field_boundary_shapefile_path}")
    exit()

try:
    field_boundary_gdf = gpd.read_file(field_boundary_shapefile_path)
    if field_boundary_gdf.empty:
        print(f"ПОМИЛКА: Файл меж поля {field_boundary_shapefile_path} порожній.")
        exit()
    # Припускаємо один полігон у файлі. Якщо їх декілька, потрібно уточнити логіку.
    field_polygon_geometry = field_boundary_gdf.geometry.iloc[0]
    print(f"Файл меж поля '{field_boundary_shapefile_path}' успішно завантажено.")
except Exception as e:
    print(f"ПОМИЛКА при читанні файлу меж поля: {e}")
    exit()

# --- ЦИКЛ ОБРОБКИ ДЛЯ КОЖНОЇ ДАТИ ---
print("\n--- Початок аналізу часових рядів ---")
for current_date_str in dates_to_analyze:
    print(f"Обробка даних для дати: {current_date_str}...")
    current_base_image_folder = os.path.join(main_data_folder_for_analysis,
f"{current_date_str}_Browser_images/")

```

```

if not os.path.isdir(current_base_image_folder):
    print(
        f" ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Директорія для дати {current_date_str} не знайдена:
{current_base_image_folder}. Пропуск дати.")
    continue

# Шляхи до вже розрахованих карт індексів
path_to_ndvi_map = os.path.join(current_base_image_folder,
f"NDVI_{current_date_str}.tif")
path_to_evi_map = os.path.join(current_base_image_folder,
f"EVI_{current_date_str}.tif")
path_to_ndwi_map = os.path.join(current_base_image_folder,
f"NDWI_{current_date_str}.tif")
path_to_nmdi_map = os.path.join(current_base_image_folder,
f"NMDI_{current_date_str}.tif")
path_to_str_map = os.path.join(current_base_image_folder,
f"STR_{current_date_str}.tif")
path_to_smi_map = os.path.join(current_base_image_folder,
f"SMI_OPTRAM_{current_date_str}.tif")

maps_for_zonal_stats = {
    "NDVI": path_to_ndvi_map,
    "EVI": path_to_evi_map,
    "NDWI": path_to_ndwi_map,
    "NMDI": path_to_nmdi_map,
    "STR": path_to_str_map,
    "SMI_OPTRAM": path_to_smi_map
}

all_index_maps_exist = True
for index_name_check, map_path_check in maps_for_zonal_stats.items():
    if not os.path.isfile(map_path_check):
        print(
            f" ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Карта індексу {index_name_check} для дати
{current_date_str} не знайдена: {map_path_check}. Пропуск дати.")
        all_index_maps_exist = False
        break
if not all_index_maps_exist:
    continue

# Розрахунок середніх значень для поля
try:
    # Перевірка та репроекція геометрії поля, якщо CRS не співпадають

```

```

# (Беремо CRS з першої доступної карти індексу, наприклад, NDVI)
with rasterio.open(path_to_ndvi_map) as ref_raster_src:
    raster_crs = ref_raster_src.crs
    raster_affine = ref_raster_src.transform # Зберігаємо афінне
перетворення

    if field_boundary_gdf.crs != raster_crs:
        print(f"    Репроєкція меж поля з {field_boundary_gdf.crs} до
{raster_crs}...")
        field_gdf_reprojected_for_zonal = field_boundary_gdf.to_crs(raster_crs)
        current_field_geom_for_zonal =
field_gdf_reprojected_for_zonal.geometry.iloc[0]
    else:
        current_field_geom_for_zonal = field_polygon_geometry

    mean_ndvi_val = \
        zonal_stats(current_field_geom_for_zonal, path_to_ndvi_map, stats="mean",
nodata=np.nan, affine=raster_affine)[
            0]['mean']
    mean_evi_val = \
        zonal_stats(current_field_geom_for_zonal, path_to_evi_map, stats="mean",
nodata=np.nan, affine=raster_affine)[
            0]['mean']
    mean_ndwi_val = \
        zonal_stats(current_field_geom_for_zonal, path_to_ndwi_map, stats="mean",
nodata=np.nan, affine=raster_affine)[
            0]['mean']
    mean_nmdi_val = \
        zonal_stats(current_field_geom_for_zonal, path_to_nmdi_map, stats="mean",
nodata=np.nan, affine=raster_affine)[
            0]['mean']
    mean_str_val = \
        zonal_stats(current_field_geom_for_zonal, path_to_str_map, stats="mean",
nodata=np.nan, affine=raster_affine)[
            0]['mean']
    mean_smi_val = \
        zonal_stats(current_field_geom_for_zonal, path_to_smi_map, stats="mean",
nodata=np.nan, affine=raster_affine)[
            0]['mean']

    time_series_data["Date"].append(current_date_str)
    time_series_data["Mean_NDVI"].append(mean_ndvi_val)
    time_series_data["Mean_EVI"].append(mean_evi_val)

```

```

time_series_data["Mean_NDWI"].append(mean_ndwi_val)
time_series_data["Mean_NMDI"].append(mean_nmdi_val)
time_series_data["Mean_STR"].append(mean_str_val)
time_series_data["Mean_SMI_OPTRAM"].append(mean_smi_val)

print(
    f" Середні значення для {current_date_str}: NDVI={mean_ndvi_val:.3f},
    EVI={mean_evi_val:.3f}, NDWI={mean_ndwi_val:.3f}, NMDI={mean_nmdi_val:.3f},
    STR={mean_str_val:.3f}, SMI={mean_smi_val:.3f}")

except Exception as e:
    print(f" ПОМИЛКА при розрахунку зональної статистики для дати
    {current_date_str}: {e}")
    # Додаємо NaN, щоб не порушувати структуру DataFrame
    time_series_data["Date"].append(current_date_str)
    for key in list(time_series_data.keys())[1:]: # Пропускаємо "Date"
        time_series_data[key].append(np.nan)

# --- ЗБЕРЕЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧАСОВИХ РЯДІВ У CSV ---
df_time_series = pd.DataFrame(time_series_data)
csv_output_path_final = os.path.join(output_folder_for_time_series,
"mean_indices_time_series_final.csv")
try:
    df_time_series.to_csv(csv_output_path_final, index=False, float_format='%.4f')
    print(f"\nСередні значення індексів (часовий ряд) збережено у:
    {csv_output_path_final}")
except Exception as e:
    print(f"ПОМИЛКА при збереженні фінального CSV: {e}")

# --- ПОБУДОВА ГРАФІКІВ ЧАСОВИХ РЯДІВ ---
if not df_time_series.empty and df_time_series.shape[0] > 1: # Потрібно більше
однієї точки для графіка
    # Конвертуємо дати для правильного відображення на осі X
    plot_dates_final = [datetime.strptime(d_str, "%Y-%m-%d") for d_str in
df_time_series["Date"]]

    indices_columns_to_plot = ["Mean_NDVI", "Mean_EVI", "Mean_NDWI", "Mean_NMDI",
"Mean_SMI_OPTRAM"]
    plot_titles = ["NDVI (середнє по полю)", "EVI (середнє по полю)",
"NDWI Gao (середнє по полю)", "NMDI (середнє по полю)",
"SMI OPTRAM (середнє по полю)"]
    y_labels = "Значення індексу"

```

```

num_plots = len(indices_columns_to_plot)
# Визначаємо кількість рядків та стовпців для subplot
num_cols_subplot = 2
num_rows_subplot = (num_plots + num_cols_subplot - 1) // num_cols_subplot #
Округлення вгору

plt.figure(figsize=(12, num_rows_subplot * 4)) # Адаптуємо розмір фігури
for i, (index_col_name, plot_title_text) in
enumerate(zip(indices_columns_to_plot, plot_titles)):
    if df_time_series[index_col_name].notna().sum() > 1: # Перевіряємо, чи є
хоча б 2 не-NaN значення
        plt.subplot(num_rows_subplot, num_cols_subplot, i + 1)
        plt.plot(plot_dates_final, df_time_series[index_col_name], marker='o',
linestyle='-')
        plt.title(plot_title_text, fontsize=14)
        plt.xlabel("Пік/Дата", fontsize=12)
        plt.ylabel(y_labels, fontsize=12)
        plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)
        plt.xticks(rotation=30, ha="right") # Покращено відображення дат

plt.gca().xaxis.set_major_formatter(plt.matplotlib.dates.DateFormatter('%Y-%m-%d'))
# Формат дати
    else:
        print(f" Недостатньо даних для побудови графіка {plot_title_text}")
        plt.subplot(num_rows_subplot, num_cols_subplot, i + 1)
        plt.text(0.5, 0.5, 'Недостатньо даних', horizontalalignment='center',
verticalalignment='center')
        plt.title(plot_title_text, fontsize=14)

# Окремий графік для STR, якщо є дані
if df_time_series["Mean_STR"].notna().sum() > 1:
    # Знаходимо наступне вільне місце або створюємо нову фігуру, якщо всі місця
зайняті
    if num_plots % num_cols_subplot == 0: # Якщо кількість індексів парна,
потрібне нове місце
        str_plot_position = num_plots + 1
    else: # Якщо непарна, використовуємо останнє місце в останньому рядку
        str_plot_position = num_rows_subplot * num_cols_subplot

    if str_plot_position > num_rows_subplot * num_cols_subplot: # Якщо треба
більше місць, ніж є
        # Можна створити нову фігуру для STR або збільшити кількість рядків
        plt.figure(figsize=(7, 5)) # Окрема фігура для STR

```

```

        plt.plot(plot_dates_final, df_time_series["Mean_STR"], marker='s',
linestyle='--', color='purple')
        plt.title("STR (середнє по полю)", fontsize=14)
    else:
        plt.subplot(num_rows_subplot, num_cols_subplot, str_plot_position)
        plt.plot(plot_dates_final, df_time_series["Mean_STR"], marker='s',
linestyle='--', color='purple')
        plt.title("STR (середнє по полю)", fontsize=14)

    plt.xlabel("Рік/Дата", fontsize=12)
    plt.ylabel("Значення STR", fontsize=12)
    plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)
    plt.xticks(rotation=30, ha="right")
    plt.gca().xaxis.set_major_formatter(plt.matplotlib.dates.DateFormatter('%Y-
%m-%d'))
    else:
        print(f" Недостатньо даних для побудови графіка STR")

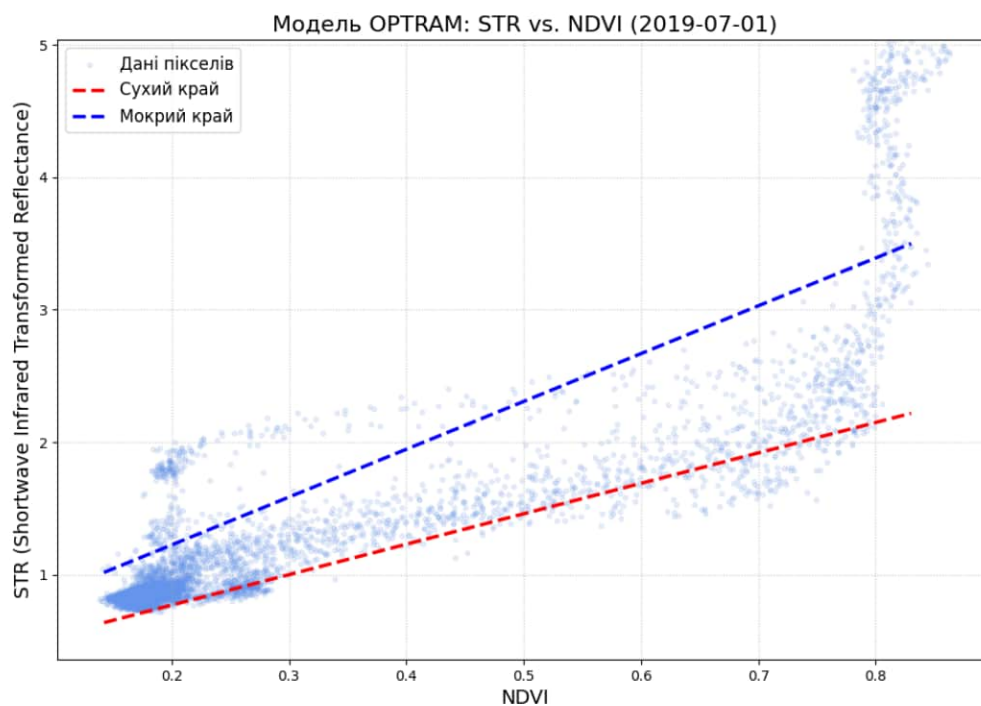
    plt.tight_layout(pad=2.0) # Зменшено pad для уникнення перекриттів
    time_series_plot_path_final = os.path.join(output_folder_for_time_series,
"indices_time_series_plot_final.png")
    plt.savefig(time_series_plot_path_final)
    # plt.show() # Закоментуйте, якщо не хочете показувати графіки одразу
    print(f"\nГрафіки часових рядів збережено у: {time_series_plot_path_final}")
else:
    print("\nНемає даних або недостатньо дат для побудови графіків часових рядів.")

print("\n--- Повний аналіз часових рядів завершено ---")

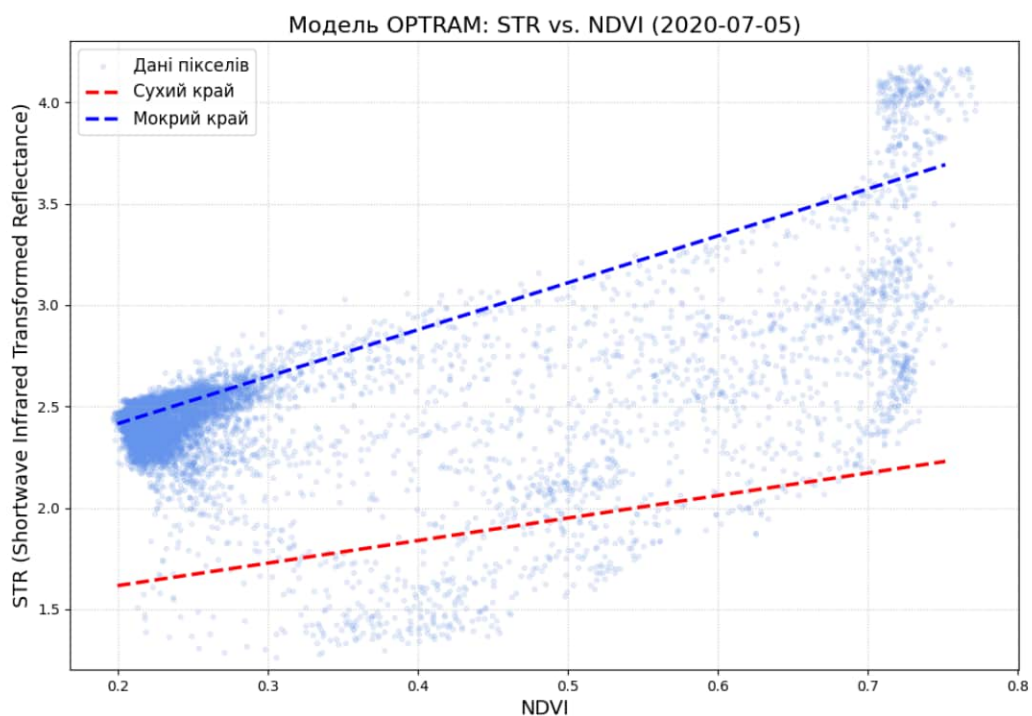
```

## ДОДАТОК Б

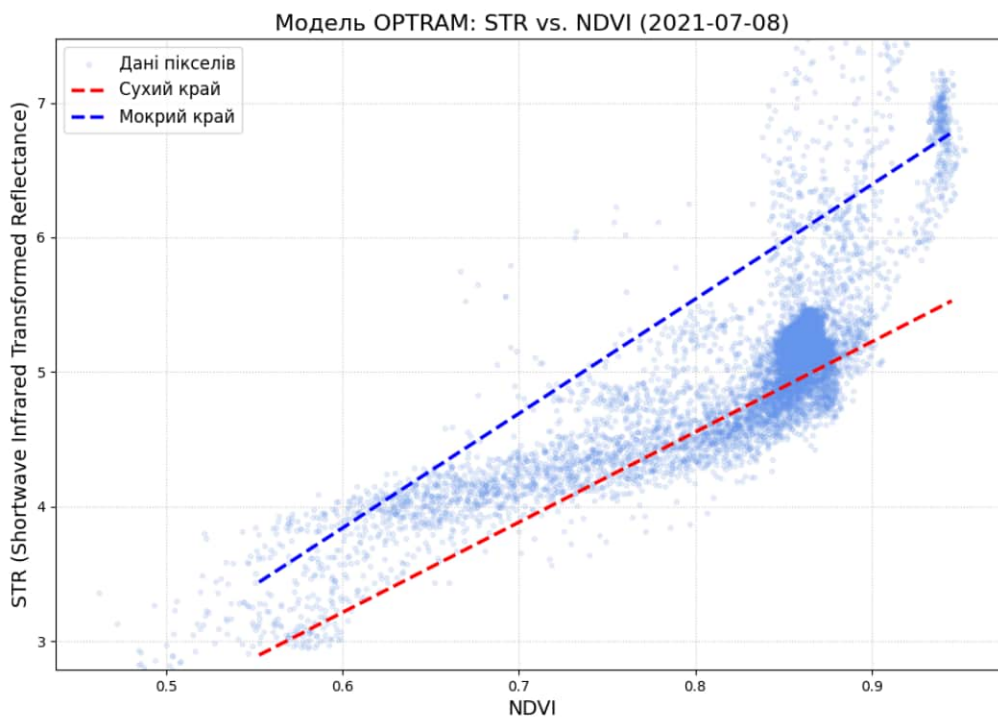
### Приклади графіків STR vs NDVI для моделі OPTRAM



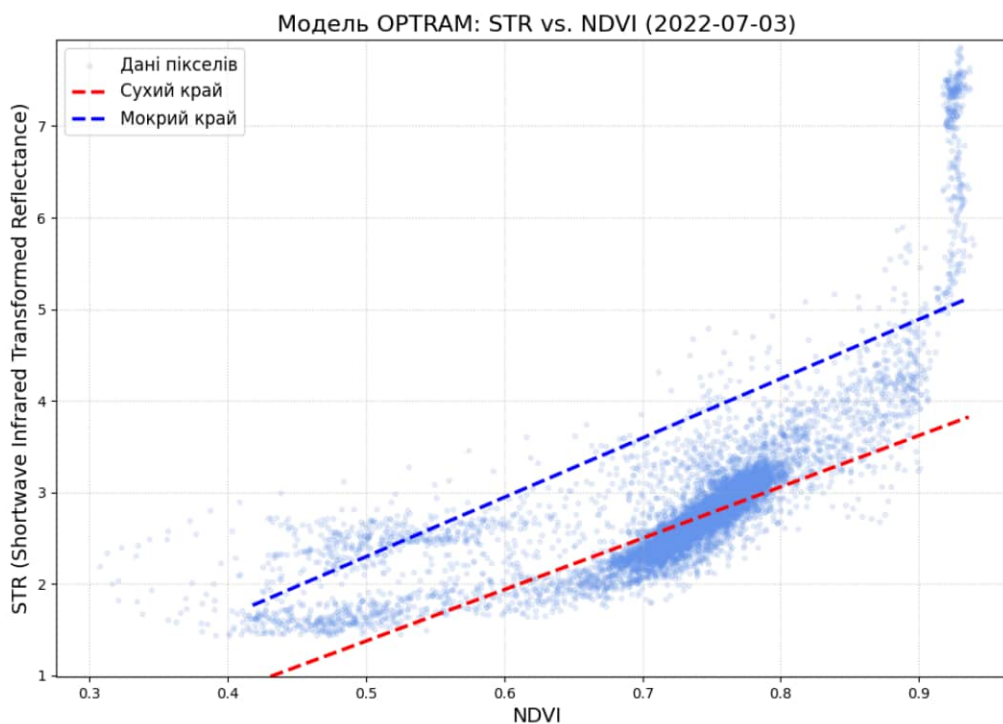
(Рисунок Б.1 – Діаграма розсіювання STR vs NDVI для моделі OPTRAM 2019-07-01)



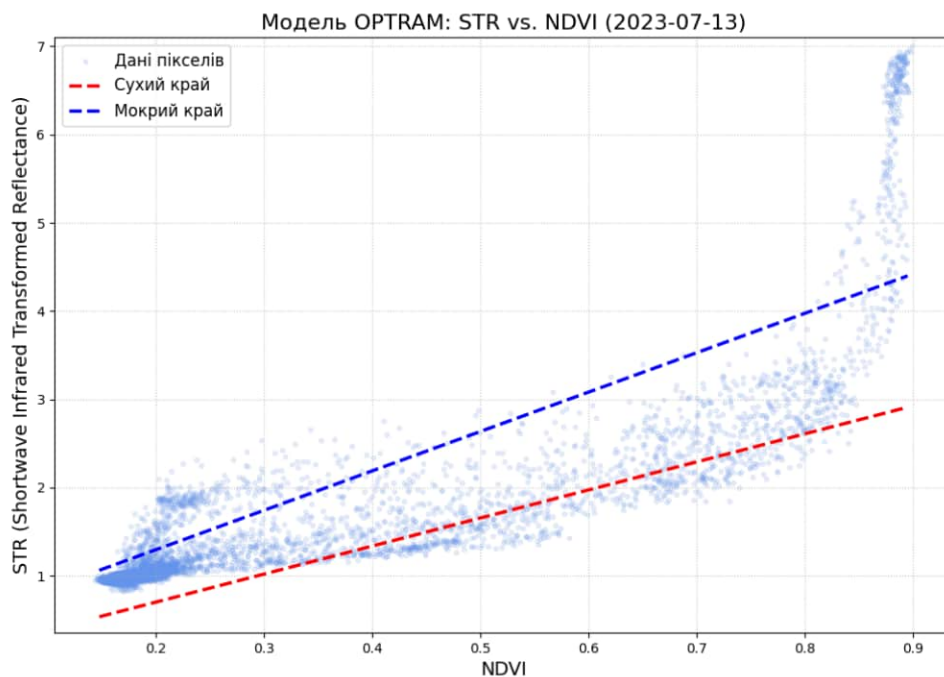
(Рисунок Б.2 – Діаграма розсіювання STR vs NDVI для моделі OPTRAM 2020-07-05)



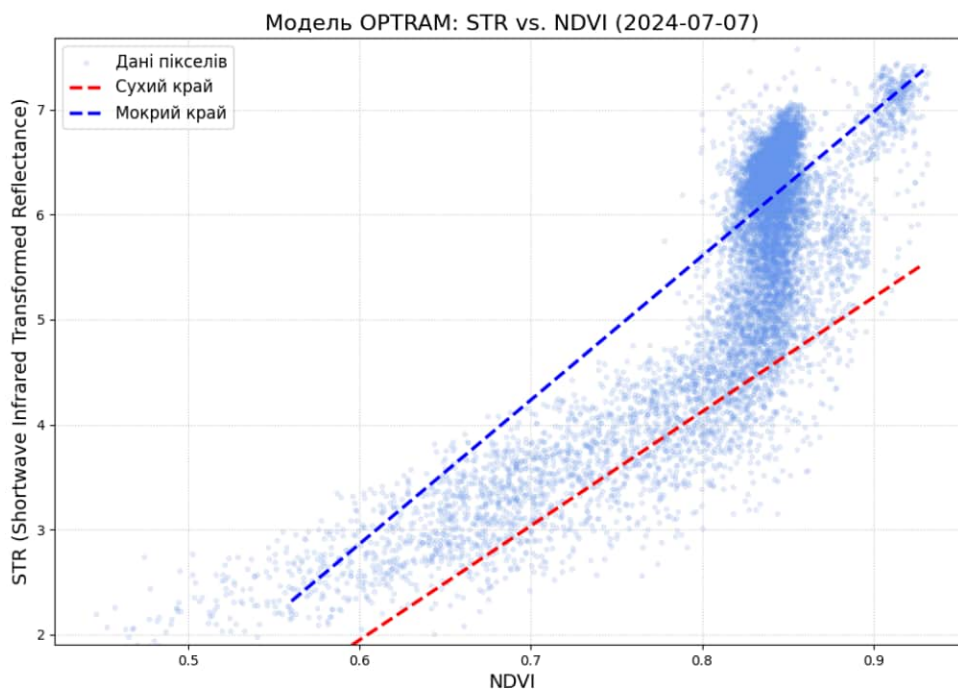
**(Рисунок Б.3 – Діаграма розсіювання STR vs NDVI для моделі OPTRAM  
2021-07-08)**



**(Рисунок Б.4 – Діаграма розсіювання STR vs NDVI для моделі OPTRAM  
2022-07-03)**



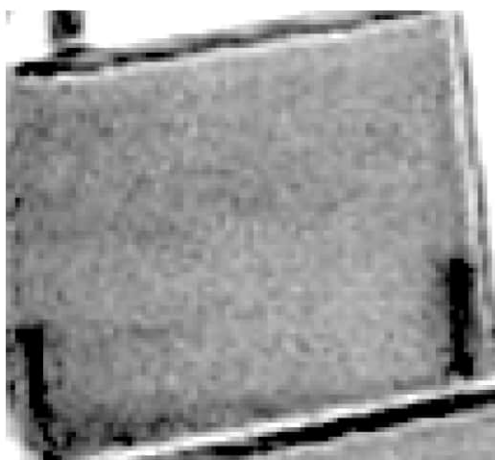
**(Рисунок Б.5 – Діаграма розсіювання STR vs NDVI для моделі OPTRAM  
2023-07-13)**



**(Рисунок Б.6 – Діаграма розсіювання STR vs NDVI для моделі OPTRAM  
2024-07-07)**

## ДОДАТОК В

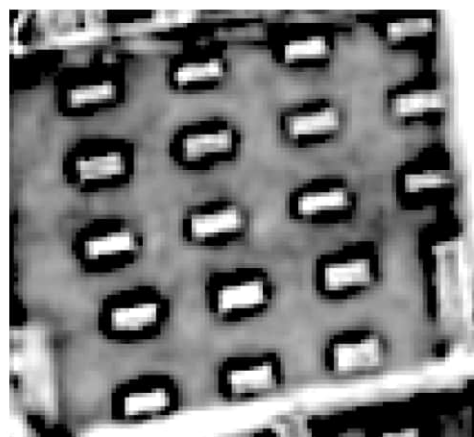
### В.1 Приклади карт індексу SMI\_OPTRAM



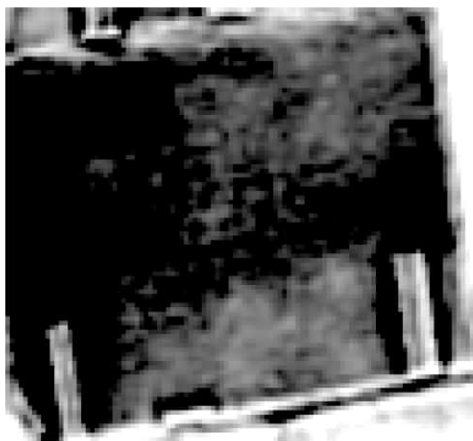
(Рисунок В.1.1 – Карта індексу SMI\_OPTRAM 2019-07-01)



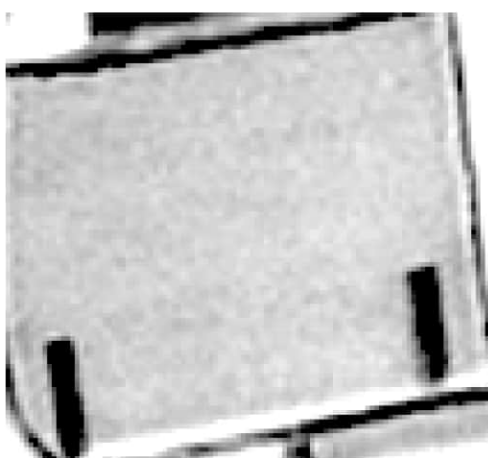
(Рисунок В.1.2 – Карта індексу SMI\_OPTRAM 2020-07-05)



(Рисунок В.1.3 – Карта індексу SMI\_OPTRAM 2021-07-08)



**(Рисунок В.1.4 – Карта індексу SMI\_OPTRAM 2022-07-03)**



**(Рисунок В.1.5 – Карта індексу SMI\_OPTRAM 2023-07-13)**

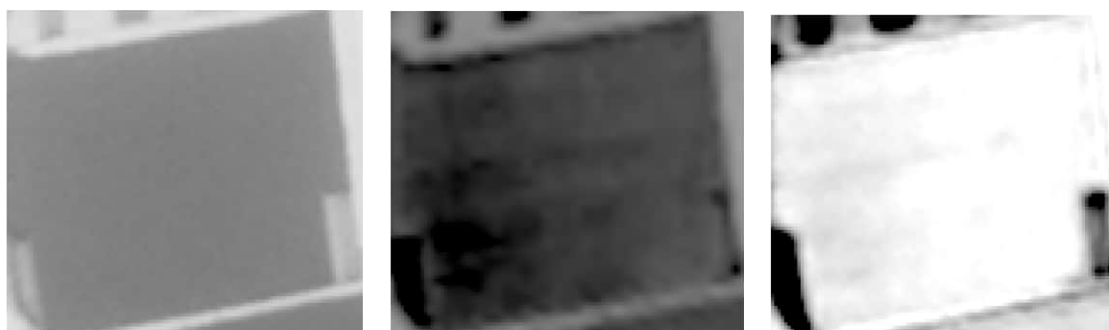


**(Рисунок В.1.6 – Карта індексу SMI\_OPTRAM 2024-07-07)**

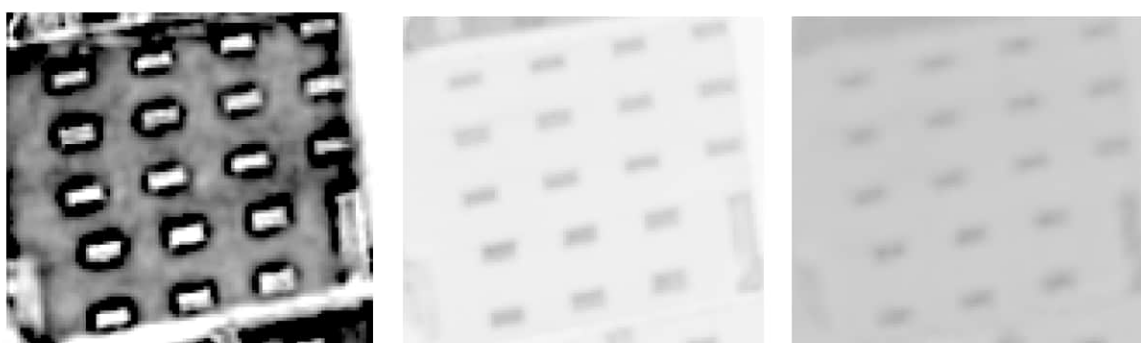
## **В.2 згенеровані карти індексів NDVI, NDWI, SMI**



**(Рисунок В.2.1 – Карта індексу NDVI, NDWI, SMI 2019-07-01)**



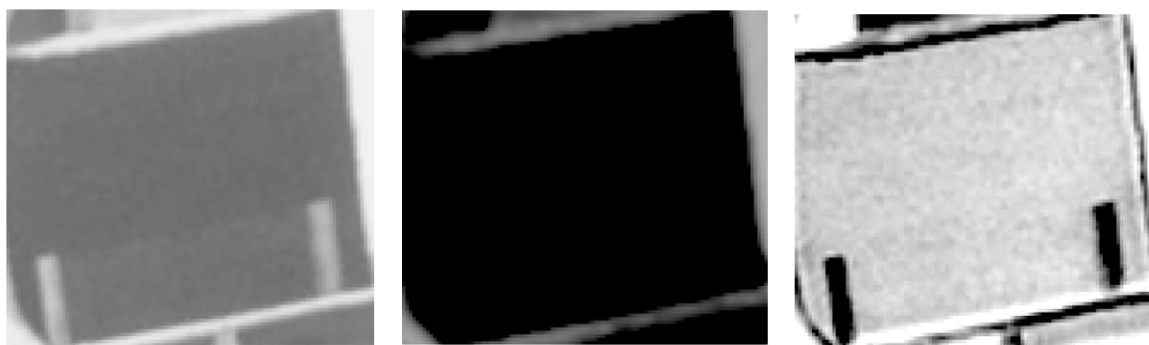
**(Рисунок В.2.2 – Карта індексу NDVI, NDWI, SMI 2020-07-05)**



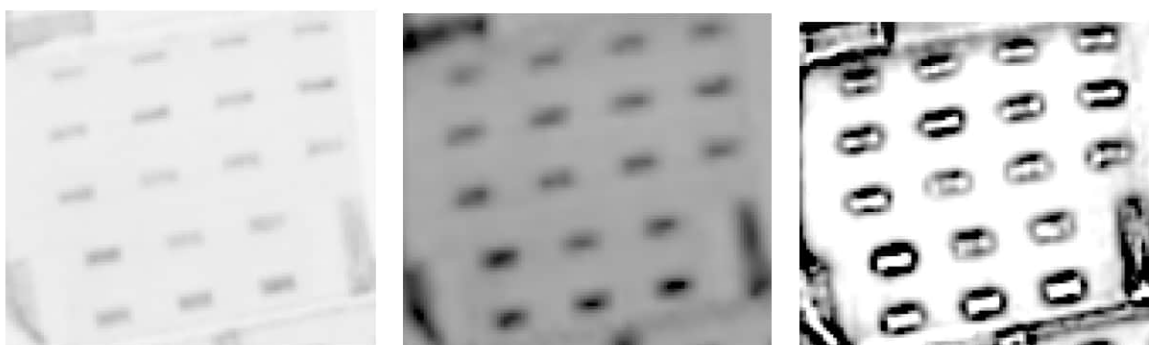
**(Рисунок В.2.3 – Карта індексу NDVI, NDWI, SMI 2021-07-08)**



**(Рисунок В.2.4 – Карта індексу NDVI, NDWI, SMI 2022-07-03)**



**(Рисунок В.2.5 – Карта індексу NDVI, NDWI, SMI 2023-07-13)**



**(Рисунок В.2.6 – Карта індексу NDVI, NDWI, SMI 2024-07-07)**