

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

ГРУПА ГЗЗМ-24-1

БОЙКО АННА

**2025**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ  
Інститут архітектури та будівництва `ІФНТУНГ-ДОННАБА`  
Кафедра геодезії та землеустрою

**БОЙКО АННА ПЕТРІВНА**

(прізвище, ім'я, по батькові)

**УДК 528.77**

(індекс)

## **МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**Моніторинг змін водної поверхні та рослинного  
покриву в районі с. Новоберислав за  
супутниковими індексами NDVI та NDWI Sentinel-2  
(2021–2025 рр.)**

(назва роботи)

**Землеустрій та кадастр**

(назва освітньої програми)

**Геодезія та землеустрій**

(шифр і назва спеціальності)

**Бойко Анна, студентка групи ГЗЗм-24-1**

(підпис, ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача освітнього ступеня)

**Науковий керівник: к.т.н, доцент Володимир РОМАНЮК**

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

**Допущено до захисту**

**Завідувач кафедри**

**проф. Микола ПРИХОДЬКО**

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**Рецензент**

**професор**

**д.г.н. Микола ПРИХОДЬКО**

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

**Івано-Франківськ –2025**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**Інститут архітектури та будівництва 'ІФНТУНГ-ДонНАБА'**

**Кафедра Геодезії та землеустрою**

**Освітній рівень магістр**

**Спеціальність Геодезія та землеустрій**

**Освітня програма Землеустрій та кадастр**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри геодезії та землеустрою**

**проф. Микола ПРИХОДЬКО**

**"\_\_" \_\_\_\_\_ р.**

## **ЗАВДАННЯ**

### **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ**

**Бойко Анні Петрівні**

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1.Тема роботи: Моніторинг змін водної поверхні та рослинного покриву в районі с. Новоберислав за супутниковими індексами NDVI та NDWI Sentinel-2 (2021–2025 рр.)**

**керівник роботи: к.т.н, доцент Володимир Романюк**

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРИЗВИЩЕ)

затверджена наказом вищого навчального закладу від 28.11.2025 року № 743/7

**2.Строк подання студентом роботи 22 грудня 2025 року**

**3.Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики, статистичні дані, супутникові знімки**

**4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібнорозробити):**

- 1. Теоретичні основи використання супутникових даних Sentinel-2**
- 2. Аналіз сучасних підходів до супутникового моніторингу земельних та водних ресурсів**
- 3. Оцінювання наслідків порушення гідрологічного режиму території за супутниковими даними Sentinel-2**

**5. Перелік графічного матеріалу:**

*Схема розміщення супутників місії Sentinel-2 на орбіті; конфігурація супутників Sentinel-2A та Sentinel-2B; просторова роздільна здатність спектральних каналів Sentinel-2; карта розташування досліджуваної території (полігон с.*

Новоберислав); супутникове зображення Каховського водосховища до та після підриву Каховської ГЕС; карти індексу NDVI (2021, 2023, 2025); карти індексу NDWI (2021, 2023, 2025); спектральні канали Sentinel-2 MSI та їхні характеристики; порівняльна характеристика індексів NDVI та NDWI та їх застосування; класифікація значень індексу NDVI для оцінки стану рослинного покриву; класифікація значень індексу NDWI для оцінки зволоження поверхні та водних об'єктів; порівняльна оцінка площ класів NDVI за 2021,2023,2025 роки; порівняльна оцінка площ класів NDWI за 2021,2023,2025 роки; динаміка змін рослинного покриву за індексом NDVI; динаміка змін водної поверхні за індексом NDWI.

**Дата видачі завдання: 01.10.2025**

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування теми, визначення мети, об'єкта та предмета дослідження	01.10.25-15.11.25	
2	Опрацювання наукових джерел і теоретичних основ супутникового моніторингу	16.11.25-19.11.25	
3	Завантаження та попередня обробка супутникових знімків Sentinel-2	20.11.25-25.11.25	
4	Розрахунок індексів NDVI та NDWI, побудова тематичних карт у QGIS	26.11.25-13.12.25	
5	Аналіз результатів, оцінка змін водної поверхні та рослинного покриву	14.12.25-17.12.25	
6	Оформлення магістерської роботи та підготовка до захисту	18.12.25-21.12.25	

Студентка \_\_\_\_\_ **Анна БОЙКО**

(підпис)

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ **к.т.н, доцент Володимир РОМАНЮК**

(підпис)

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

## **Анотація**

Розрахунково-пояснювальна записка: 66 сторінок, 21 рисунок, 45 посилань.

Магістерська робота присвячена дослідженню змін водної поверхні та рослинного покриву на основі супутникових даних Sentinel-2 із використанням спектральних індексів NDVI та NDWI на території с. Новоберислав і прилеглих земель у період 2021–2025 років. Актуальність дослідження зумовлена трансформацією гідрологічного режиму Півдня України внаслідок підриву Каховської ГЕС.

У роботі розглянуто теоретичні основи застосування супутникових даних, проаналізовано міжнародний досвід супутникового моніторингу та обґрунтовано вибір методики дослідження. Практична частина включає аналіз змін водної поверхні та рослинного покриву за індексами NDVI та NDWI, побудову тематичних карт за 2021, 2023 і 2025 роки, класифікацію значень індексів і оцінювання динаміки змін.

Отримані результати можуть бути використані для потреб землеустрою, екологічного моніторингу та планування відновлення територій, що зазнали впливу гідрологічних катастроф.

**Ключові слова:** SENTINEL-2, NDVI, NDWI, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ, МОНІТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ, QGIS, НОВОБЕРИСЛАВ

## **Abstract**

Calculation and explanatory note: 66 pages, 21 figures, 45 links.

The master's thesis focuses on the assessment of changes in surface water and vegetation cover based on Sentinel-2 satellite data using the NDVI and NDWI spectral indices within the territory of Novoberislav village and adjacent areas for the period 2021–2025. The relevance of the study is associated with the transformation of the hydrological regime of southern Ukraine caused by the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant.

The study considers the theoretical background of satellite data application, analyses international experience in satellite monitoring, and substantiates the selected research methodology. The practical part includes the analysis of changes in surface water and vegetation cover using NDVI and NDWI indices, the generation of thematic maps for 2021, 2023, and 2025, the classification of index values, and the assessment of change dynamics.

The obtained results can be applied in land management, environmental monitoring, and planning the restoration of territories affected by hydrological disasters.

**Keywords: SENTINEL-2, NDVI, NDWI, REMOTE SENSING, LAND MONITORING, QGIS, NOVOBERISLAV.**

<b>ЗМІСТ</b>	
<b>Вступ</b>	1
<b>Розділ 1. Теоретичні основи використання супутникових даних Sentinel-2</b>	3
<b>1.1 Система Copernicus та місія Sentinel-2</b>	3
<b>1.2 Спектральні канали Sentinel-2 та їхні характеристики</b>	5
<b>1.3 Рівні супутникової продукції L1C та L2A Sentinel-2</b>	8
<b>1.4 Атмосферна корекція даних та алгоритм Sen2Cor</b>	9
<b>1.5 Значення індексів NDVI та NDWI у моніторингу земель і водних ресурсів</b>	10
<b>Розділ 2. Аналіз сучасних підходів до супутникового моніторингу земельних та водних ресурсів</b>	13
<b>2.1 Сучасні підходи до супутникового моніторингу земельних та водних ресурсів</b>	13
<b>2.2 Супутниковий моніторинг земельних ресурсів у міжнародній практиці</b>	14
<b>2.2.1 Міжнародний досвід моніторингу рослинного покриву на основі NDVI</b>	15
<b>2.2.2 Аналіз змін земного покриву за багаточасовими супутниковими даними</b>	16
<b>2.2.3 Моніторинг сільськогосподарських земель за часовими рядами NDVI</b>	18
<b>2.3 Супутниковий моніторинг водних ресурсів у міжнародній практиці</b>	19
<b>2.3.1 Використання індексу NDWI для моніторингу водних об'єктів</b>	19
<b>2.3.2 Аналіз динаміки водних об'єктів за супутниковими даними</b>	21
<b>2.3.3 Виявлення екологічних та антропогенних змін водних об'єктів</b>	22
<b>2.4 Обґрунтування вибору методу супутникового моніторингу</b>	24
<b>Розділ 3. Оцінювання наслідків порушення гідрологічного режиму за даними Sentinel-2</b>	26
<b>3.1 Передумови та наслідки підриву Каховської ГЕС</b>	26
<b>3.2 Характеристика території дослідження та обґрунтування її вибору</b>	28
<b>3.3 Методика отримання та обробки супутникових даних Sentinel-2</b>	30
<b>3.4 Аналіз змін рослинного покриву за індексом NDVI</b>	34
<b>3.5 Аналіз змін водної поверхні за індексом NDWI</b>	44
<b>3.6 Узагальнення результатів та практичні рекомендації</b>	53
<b>Висновки та пропозиції</b>	55
<b>Список літературних джерел</b>	57
<b>Додатки</b>	60

## Вступ

**Актуальність теми.** Актуальність теми магістерської роботи зумовлена необхідністю оперативної, об'єктивної та просторово деталізованої оцінки змін стану земель і водних ресурсів у прибережних зонах Півдня України, які зазнали суттєвих гідрологічних та екологічних трансформацій унаслідок масштабних антропогенних подій. Підрив Каховської гідроелектростанції спричинив різку зміну гідрологічного режиму регіону, що проявилось в осушенні значних площ заплави, деградації водних об'єктів, трансформації структури земного покриву та порушенні функціонування прибережних захисних смуг. Такі процеси безпосередньо вплинули на якість ґрунтів, умови землекористування, продуктивність сільськогосподарських угідь і екологічний стан територій.

У зазначених умовах традиційні польові методи спостереження є обмеженими або малоефективними, що підвищує роль методів дистанційного зондування Землі. Використання супутникових даних Sentinel-2 у поєднанні зі спектральними індексами NDVI та NDWI дає змогу здійснювати систематичний моніторинг змін рослинного покриву та зволоженості території, оперативно виявляти деградовані ділянки, аналізувати напрямки трансформації землекористування та формувати науково обґрунтовані управлінські рішення у сфері землеустрою.

Таким чином, дослідження просторово-часової динаміки земель і водних ресурсів на основі супутникових даних є надзвичайно актуальним у контексті післякризового відновлення територій, забезпечення сталого розвитку та підвищення ефективності управління земельними ресурсами.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є комплексне оцінювання змін стану земель і водних ресурсів у районі села Новоберислав у 2021–2025 роках на основі супутникових знімків Sentinel-2 шляхом розрахунку спектральних індексів NDVI та NDWI, побудови тематичних карт і аналізу просторово-часових тенденцій трансформації земного покриву з метою обґрунтування рішень у сфері землевпорядкування та раціонального використання території.

**Завдання дослідження.** Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено виконання таких завдань:

– зібрати та проаналізувати багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2 за 2021, 2023 та 2025 роки;

- здійснити попередню обробку супутникових даних, включаючи атмосферну корекцію, перепроєктування та просторове обрізання відповідно до меж досліджуваної території;
- розрахувати спектральні індекси NDVI та NDWI для кожного досліджуваного року;
- побудувати тематичні карти просторового розподілу значень індексів та виконати їх класифікацію;
- провести порівняльний аналіз динаміки рослинного покриву та водної поверхні у 2021–2025 роках із визначенням площ відповідних класів;
- узагальнити отримані результати, встановити причини виявлених змін та сформулювати практичні рекомендації щодо моніторингу й раціонального використання земель у контексті землевпорядкування.

**Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає в комплексному поєднанні аналізу спектральних індексів NDVI та NDWI для різних часових зрізів (2021, 2023, 2025 роки) з урахуванням різких гідрологічних змін, спричинених руйнуванням Каховської ГЕС. Це дало змогу простежити просторово-часову динаміку стану земель і водної поверхні на локальному рівні з підвищеною детальністю та точністю.

На відміну від підходів, що базуються на аналізі одного індексу або окремого року спостережень, у роботі запропоновано методичний підхід, який одночасно враховує зміни рослинності та водності території, дозволяє кількісно оцінювати площі деградованих і відновлюваних земель, а також ідентифікувати критичні ділянки прибережної захисної смуги. Удосконалено практичний алгоритм обробки супутникових даних у середовищі QGIS шляхом поєднання точного маскування, зональної статистики та порівняльного картографування, що підвищує інформативність результатів для землевпорядного аналізу в посткризових умовах. **Об’єкт дослідження.** Об’єктом дослідження є територія села Новоберислав та прилеглі земельні й водні ресурси, що зазнали просторово-часових змін під впливом природних і антропогенних факторів.

**Предмет дослідження.** Предметом дослідження є зміни стану рослинного покриву та водної поверхні на території дослідження, визначені на основі аналізу багатоспектральних супутникових знімків Sentinel-2 і спектральних індексів NDVI та NDWI, а також можливості їх практичного застосування для моніторингу та землевпорядного оцінювання території.

# Розділ 1 Теоретичні основи використання супутникових даних Sentinel-2

## 1.1 Система Copernicus та місія Sentinel-2

Програма Copernicus — це європейська система спостереження за Землею, створена Європейською комісією разом з Європейським космічним агентством (ESA). Вона призначена для забезпечення регулярного моніторингу стану навколишнього середовища, природних ресурсів та наслідків надзвичайних ситуацій [1]. Однією з основних місій програми є місія Sentinel-2, яка забезпечує отримання багатоспектральних оптичних знімків земної поверхні з високою просторовою та часовою роздільністю. Місія Sentinel-2 направлена переважно на моніторинг суші [2], [3].

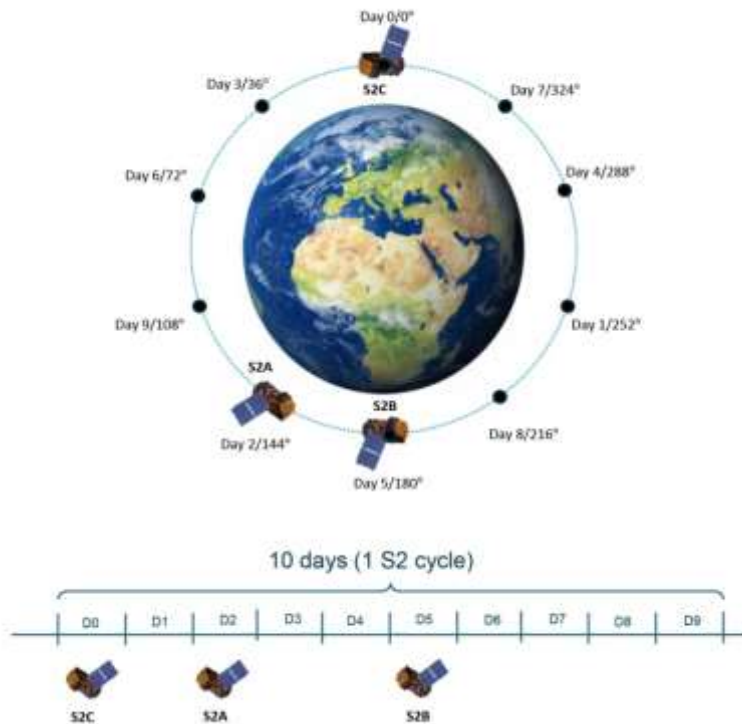


Рисунок 1.1 — Розподіл супутників Sentinel-2 на орбіті місії (джерело: Copernicus SentiWiki, European Space Agency) [1]

Місія Sentinel-2 включає два однакових супутники — Sentinel-2A та Sentinel-2B, які розміщено на сонячно-синхронній орбіті з зсувом за фазою.

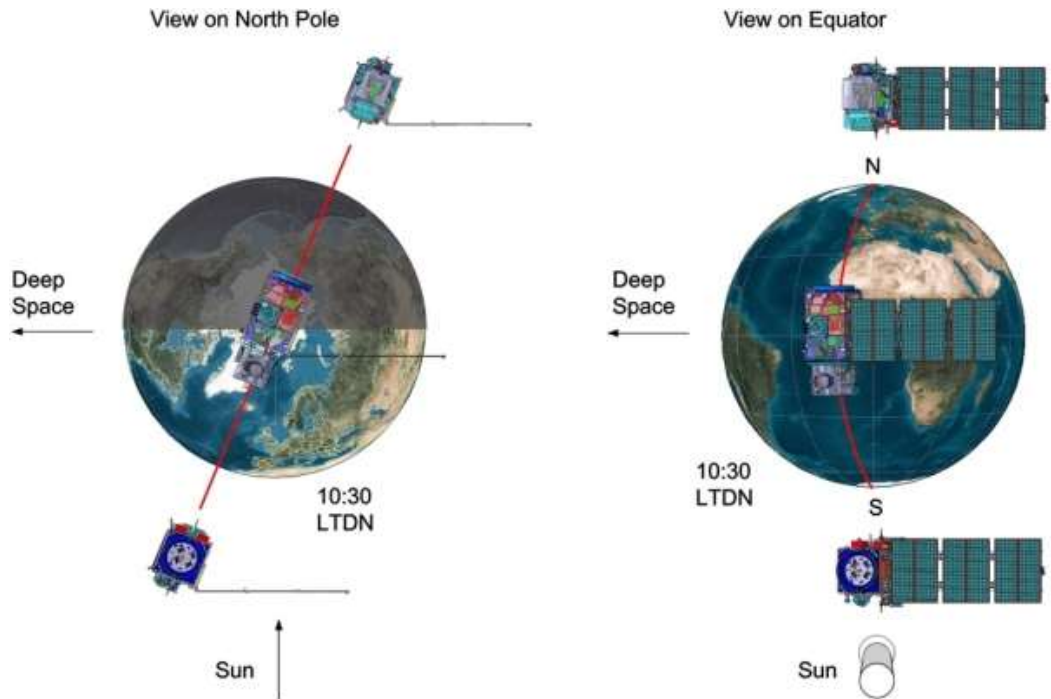


Рисунок 1.2 — Супутникова місія Sentinel-2 та конфігурація апаратів Sentinel-2A і Sentinel-2B [1]

Така конфігурація дозволяє досягти короткого періоду повторного знімання території. Це забезпечує оновлення даних приблизно кожні п'ять днів, що має важливе значення для відстеження динамічних процесів, зокрема змін рослинності, водного режиму та використання землі [2], [4].

Кожен супутник Sentinel-2 оснащений мультиспектральним інструментом MSI (Multispectral Instrument), який фіксує відбиття в 13 спектральних каналах у видимому, ближньому та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах.

Комбінування просторової роздільності 10, 20 та 60 метрів і широкого діапазону знімання (приблизно 290 км) дозволяє проводити як детальний локальний аналіз (наприклад, стан окремих полів або прибережних зон), так і регіональні дослідження змін земельного покриття [1], [3], [5].

На рисунку 1.3 наведено вигляд супутника Sentinel-2C під час передстартових тестів у технічному центрі ESA (2023 р.), що демонструє конструкцію апарата та розміщення панелей.

Важливою перевагою місії Sentinel-2 для науки та практичних застосувань є політика відкритого доступу до даних: супутникові знімки надаються користувачам безкоштовно через офіційні сервіси ESA та Copernicus.



Рисунок 1.3 – Космічний апарат Sentinel-2C під час передстартових випробувань [3]

Важливою перевагою місії Sentinel-2 для науки та практичних застосувань є політика відкритого доступу до даних: супутникові знімки надаються користувачам безкоштовно через офіційні сервіси ESA та Copernicus.

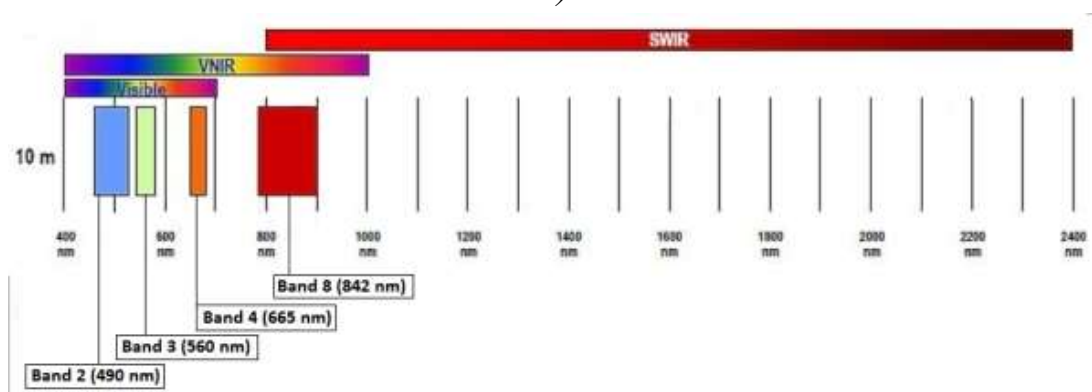
Така політика значно зменшує бар'єри для впровадження методів дистанційного зондування у землевпорядкуванні, агромоніторингу, екологічних дослідженнях і дозволяє створювати довгострокові серії спостережень для аналізу тенденцій змін земель та водних ресурсів [1], [4].

### **1.2 Спектральні канали Sentinel-2 та їхні характеристики**

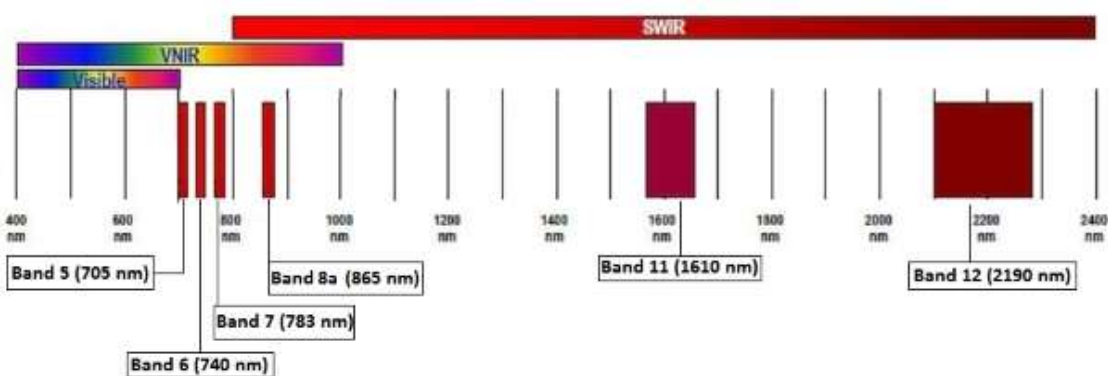
Ключовим елементом супутника Sentinel-2 є мультиспектральний сенсор MSI (Multispectral Instrument), який забезпечує знімання земної поверхні у тринадцяти спектральних каналах [1], [2]. Ці канали охоплюють видимий, ближній інфрачервоний та короткохвильовий інфрачервоний діапазони електромагнітного спектра [2]. Поєднання різних спектральних діапазонів дозволяє отримувати детальну інформацію про фізичні та біофізичні властивості земного покриву, зокрема стан рослинності, вологість поверхні та характеристики водних об'єктів [1], [2].

Особливістю сенсора MSI є те, що спектральні канали мають різну просторову роздільність — 10, 20 та 60 метрів [1], [2]. Такий підхід обумовлений необхідністю оптимального поєднання просторової деталізації та спектральної інформативності залежно від призначення каналу [2]. Для детального аналізу землекористування та рослинного покриву використовуються канали з високою просторовою роздільністю, тоді як для оцінювання атмосферних параметрів і масштабних природних процесів застосовуються канали з меншою деталізацією [1], [2]. Просторову диференціацію спектральних каналів супутника Sentinel-2 наведено на рисунку 1.4 [1].

a)



б)



в)

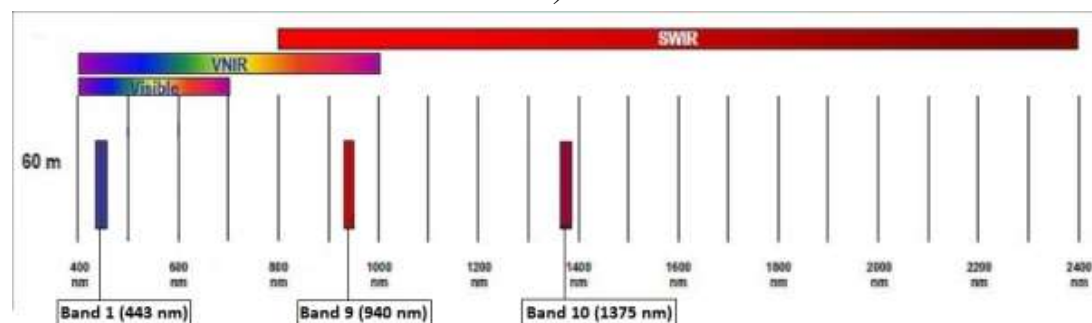


Рисунок 1.4 – Смуги просторової роздільної здатності Sentinel-2 10 (а) ,20 (б) і 60 (в) м [1]

Як видно з рисунка 1.4, канали з просторовою роздільністю 10 м забезпечують найбільш детальне відображення земної поверхні та є базовими для аналізу структури землекористування, меж сільськогосподарських угідь і стану рослинності [1]. Канали з роздільністю 20 м застосовуються для оцінювання фізичних та біохімічних характеристик рослинного покриву, а також для аналізу водних і ґрунтових поверхонь [1], [2]. Канали з просторовою роздільністю 60 м використовуються переважно для атмосферної корекції та моніторингу масштабних процесів, що впливають на якість супутникових знімків [1], [2].

Таким чином, технічні характеристики супутника Sentinel-2 та мультиспектрального сенсора MSI забезпечують широкі можливості використання отриманих даних у задачах землеустрою, кадастрового аналізу та екологічного моніторингу [1], [2]. Поєднання високої просторової роздільності, регулярності знімання та відкритого доступу до даних робить Sentinel-2 одним із ключових інструментів для аналізу змін земельних і водних ресурсів, що обґрунтовує його використання у даній магістерській роботі [1], [2].

Комбінація широкого спектрального діапазону з достатньою просторовою роздільністю дозволяє застосовувати Sentinel-2 для моніторингу земель, рослинності, водних ресурсів та комплексного аналізу стану територій у динаміці, що визначає його важливість у системі сучасного дистанційного зондування [3].

Таблиця 1 – Спектральні канали Sentinel-2 MSI та їхні характеристики

Канал	Спектральний діапазон, нм	Просторове розрізнення	Призначення
<b>B01</b>	443	60 м	Аерозолі, атмосферна корекція
<b>B02</b>	490	10 м	Синій діапазон, візуальна інтерпретація, водні об'єкти
<b>B03</b>	560	10 м	Зелений діапазон, рослинність
<b>B04</b>	665	10 м	Червоний діапазон, NDVI, рослинність
<b>B05</b>	705	20 м	Red Edge, стан рослин
<b>B06</b>	740	20 м	Red Edge, хлорофіл
<b>B07</b>	783	20 м	Red Edge, вегетація
<b>B08</b>	842	10 м	NIR, NDVI, біомаса

<b>B8A</b>	865	20 м	NIR (додатковий), водність та рослинність
<b>B09</b>	945	60 м	Водяна пара, атмосфера
<b>B10</b>	1375	60 м	Cirrus, атмосферна корекція
<b>B11</b>	1610	20 м	SWIR, NDWI, волога, ґрунт
<b>B12</b>	2190	20 м	SWIR, мінерали, ґрунти, NDWI

Джерело: [1], [2]

### 1.3 Рівні супутникової продукції L1C та L2A Sentinel-2

Дані космічної місії Sentinel-2 доступні на кількох рівнях обробки, які отримали ступінь готовності відобразити до подальшого аналізу та можливість їх коректного використання для кількох оцінок параметрів земної поверхні. Найбільш розширеними є рівні L1C та L2A, які відрізняються типом відбивної здатності, яку вони описують, а також алгоритмами атмосферної корекції, що застосовуються [1], [4].

Продукція рівня L1C містить ортотрансформовані знімки у вигляді найвищої атмосферної відбивної здатності. На цьому етапі дані вже наведені до єдиної картографічної проєкти та виправлені геометричні спотворення, але вплив атмосфери (аерозолі, водяна пара, атмосферне розсіювання) не усувається. Тому L1C підходить для візуальної інтерпретації, але без додаткової обробки не забезпечує достатньої точності для побудови спектральних показників та порівняння значень між загальними даними зйомки [1], [6]. Рівень L2A, навпаки, описує поверхневу відбивну здатність, яка отримується шляхом застосування алгоритмів атмосферної корекції.

Для Sentinel-2 стандартним інструментом є процесор Sen2Cor, який враховує властивості аерозолів, водяної пари та інших параметрів атмосфери, а також виконує класифікацію пікселів за якістю [2], [4], [5]. Використання L2A дозволяє точніше відобразити поверхню реального стану, що є критичним місцем для розрахунку індексів NDVI, NDWI та інших показників, чутливих до зміни освітлення та атмосферних умов [3], [7].

Важливою перевагою продукції L2A є наявність допоміжних масок, зокрема масок хмарності та тіней, які можна виключити з аналізу ділянки з низькою якістю знімка. Це надійність результатів при побудові часових рядів та аналізі динаміки змін, особливо в регіонах зі складними погодними умовами [2], [8], [9]. У сучасних дослідженнях дистанційного зондування саме дані рівня L2A вважаються основоположними для моніторингу земель,

рослинності та водних ресурсів, після чого забезпечується точність та відтворюваність результатів [4], [5].

На практиці різницю між продукцією рівнів L1C і L2A добре ілюструє порівняння топоатмосферного зображення (L1C), поверхневої відбитості після атмосферної корекції (L2A) та карти класифікації сцени, сформованої алгоритмом Sen2Cor.

#### **1.4 Атмосферна корекція даних та алгоритм Sen2Cor**

Одним з важливих етапів підготовки супутникових зображень Sentinel-2 для аналітичної обробки є виконання атмосферної корекції, яка дозволяє усунути вплив атмосферних часток, водяної пари та аерозолів на значення відбитості поверхні.

У стандартній продукції Sentinel-2 рівня L1C відображаються коефіцієнти топоатмосферної відбитості (TOA), тоді як рівень L2A забезпечує отримання відбитості поверхні (Bottom-Of-Atmosphere, BOA), придатної для аграрного та екологічного моніторингу. Для переходу від L1C до L2A використовується алгоритм Sen2Cor, розроблений у межах програми Copernicus, який забезпечує автоматичну обробку вегетаційних, лісових і водних ділянок [6].

Алгоритм Sen2Cor виконує корекцію атмосферного впливу шляхом моделювання радіаційного переносу та створення карти класифікації сцени (Scene Classification Map), у якій пікселі розподіляються на категорії (рослинність, ґрунт, хмари, водні поверхні тощо). Це дозволяє створювати тематичні добірки даних, уникати впливу хмарності та покращувати точність розрахунку індексів вегетації для моніторингу стану рослинності та водного балансу [7].

У рамках місії Sentinel-2 алгоритм Sen2Cor інтегрований у більшість сучасних систем обробки супутникових даних (ESA SNAP, Copernicus DIAS, SentinelHub), що значно спрощує процедуру обробки зображень для геоінформаційних досліджень земельного та водного фонду.

Висока точність корекції, автоматичне визначення класів поверхні та відповідність міжнародним стандартам роблять продукцію рівня L2A базовою для наукових та практичних робіт у галузі землеустрою [5], [6], [8].

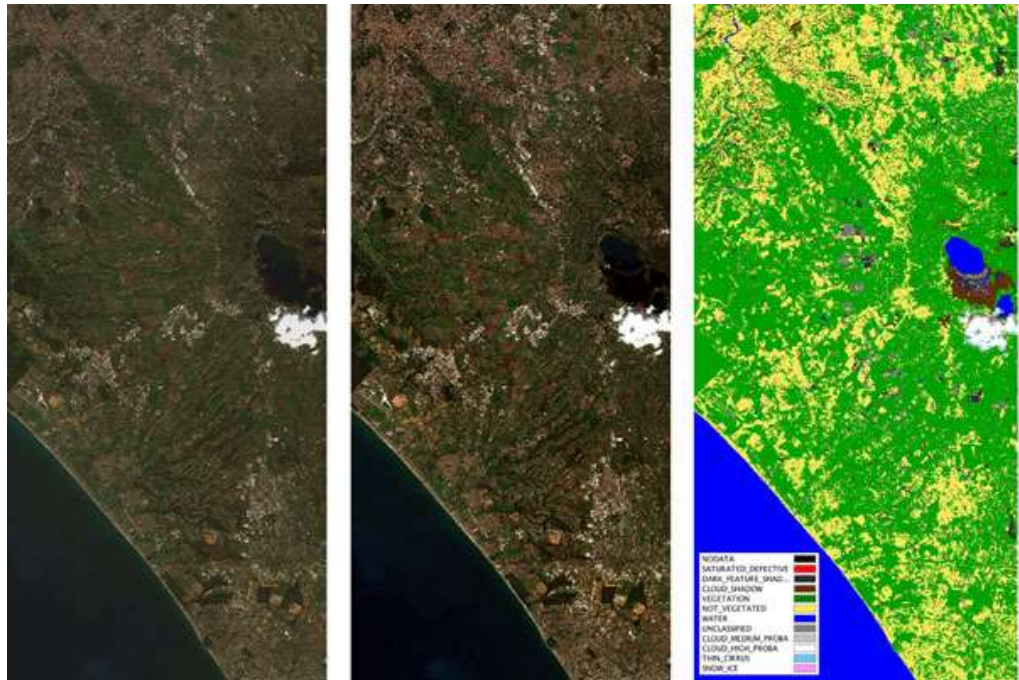


Рисунок 1.5– Порівняння супутникових зображень Sentinel-2 рівня L1C (TOA), рівня L2A (BOA) та карти класифікації сцени після атмосферної корекції. [1]

### 1.5 Значення індексів NDVI та NDWI у моніторингу земель і водних ресурсів

Індекси NDVI та NDWI є ключовими інструментами дистанційного зондування Землі, що дозволяють отримувати об'єктивну, кількісну та регулярно оновлювану інформацію про стан природного середовища. Використання цих індексів дає змогу проводити систематичний моніторинг рослинності, водних ресурсів, ґрунтового зволоження та процесів деградації територій, що є критично важливим у контексті сучасних кліматичних змін та інтенсивного землекористування [ 4 ], [ 9 ].

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) відображає інтенсивність фотосинтетичної активності та біофізичний стан рослинного покриву. Він дозволяє виявляти ділянки зі зниженою продуктивністю, оцінювати наслідки посух, пожеж, нераціональних агротехнічних рішень та змін у структурі землекористування. NDVI широко застосовується у сільському господарстві для прогнозування врожайності, оптимізації норм добрив, планування зрошення та визначення зон ризику [ 9 ], [10] , [14], [ 16 ]. У лісовому господарстві індекс допомагає виявляти осередки всихання, шкідників або незаконних вирубок.

Індекс NDWI (Normalized Difference Water Index), своєю чергою, дозволяє ідентифікувати водні об'єкти та оцінювати рівень їхнього заповнення, вологість ґрунтів і рослинності. NDWI є особливо ефективним у прибережних зонах та водозбірних басейнах, оскільки дозволяє визначати динаміку берегової лінії, зони підтоплення та осушення, оцінювати наслідки гідротехнічних аварій і зміни гідрологічного режиму територій [11], [12], [13], [19]. Для територій, що зазнали техногенних впливів або воєнних дій, NDWI стає ключовим інструментом оцінки відновлення водних систем.

Поєднане використання NDVI та NDWI забезпечує багатовимірний підхід до аналізу екосистем, дозволяючи простежити взаємозв'язок між рослинністю, водністю території, деградацією ґрунтів та змінами кліматичних умов. Синергія цих індексів є особливо важливою для регіонів, де спостерігається сезонна або техногенна зміна вологості, посилення ерозії, засолення та інші прояви деградації земель [ 11 ], [ 15 ].

У сфері землеустрою застосування NDVI та NDWI має стратегічне значення. Індекси дозволяють:

- здійснювати оперативний контроль використання земельних ділянок;
- виявляти порушення меж або видів використання земель;
- оцінювати екологічний стан у межах громад і районів;
- забезпечувати якісне картографування стану рослинності та водних об'єктів;
- формувати аналітичні матеріали для проєктів землеустрою, екоаудитів та стратегічних планів розвитку територій.

Застосування супутникових індексів також відповідає вимогам сучасних міжнародних підходів до моніторингу сталого розвитку та управління природними ресурсами, включаючи рамкові стандарти ЄС та ООН щодо обліку екосистемних послуг і просторового моніторингу [ 17 ].

Таким чином, NDVI та NDWI є фундаментальними індикаторами стану земель і водних ресурсів. Їх комплексне використання підвищує точність оцінки територіальних змін, забезпечує науково обґрунтовані рішення для землеустрою та дозволяє своєчасно реагувати на ризики деградації територій.

Таблиця 2. Порівняльна характеристика індексів NDVI та NDWI та їх застосування

Параметр	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	NDWI (Normalized Difference Water Index)
<b>Математичний вираз</b>	$(NIR - Red) / (NIR + Red)$	$(Green - SWIR) / (Green + (SWIR))$
<b>Основні канали Sentinel-2</b>	B08 (NIR), B04 (Red)	B03 (Green), B011 (SWIR)
<b>Що показує</b>	Стан, щільність та продуктивність рослинності	Вміст вологи, наявність води, межі водних об'єктів
<b>Діапазон значень</b>	-1 ... +1	-1 ... +1
<b>Високі значення</b>	+0.6 ... +0.9 — інтенсивно розвинена рослинність	+0.2 ... +1 — вода або дуже вологі поверхні
<b>Низькі значення</b>	-1 ... 0 — вода, штучні поверхні, нежива рослинність	-1 ... 0 — сухі території, ґрунт, урбанізовані зони
<b>Основні сфери застосування</b>	Сільське господарство, лісове господарство, оцінка деградації земель, моніторинг посух	Моніторинг водних ресурсів, ідентифікація підтоплень, зміна берегових ліній, гідрологічний аналіз
<b>Переваги</b>	Висока чутливість до змін рослинності; підходить для сезонного аналізу	Добре виявляє воду, працює навіть при частковому заболоченні
<b>Обмеження</b>	Вода та голий ґрунт інколи дають схожі значення	Чутливий до шуму та відбивної здатності поверхонь без вологи

Джерело: [9], [11], [13], [

## **Розділ 2 Аналіз сучасних підходів до супутникового моніторингу земельних та водних ресурсів**

### **2.1 Сучасні підходи до супутникового моніторингу земельних та водних ресурсів**

У сучасній науковій та прикладній практиці моніторинг земельних і водних ресурсів все частіше базується на використанні даних дистанційного зондування Землі, які забезпечують регулярне, просторово узгоджене та об'єктивне спостереження за станом територій. Супутникові методи дозволяють охоплювати великі площі, проводити багаторазові спостереження в часі та аналізувати динаміку природних і антропогенних змін без необхідності постійних наземних обстежень, що особливо важливо для завдань землеустрою та екологічного моніторингу [16], [21].

У міжнародній практиці для оцінки змін земельного покриву, рослинності та водних об'єктів використовуються різні супутникові платформи, серед яких найбільш поширеними є Landsat, Sentinel-2 та MODIS. Кожна з них має свої особливості, що визначають сферу доцільного застосування. Дані супутників серії Landsat характеризуються наявністю тривалих архівів спостережень, що дозволяє аналізувати довгострокові тенденції змін землекористування та деградації земель. Водночас просторової роздільності цих знімків часто недостатньо для детального аналізу дрібномасштабних об'єктів, таких як вузькі прибережні зони або малі водні об'єкти [16].

Супутники MODIS, у свою чергу, забезпечують високу частоту знімання та використовуються переважно для глобального й регіонального моніторингу природних процесів. Проте їх низька просторова роздільність обмежує можливість застосування у землевпорядних дослідженнях локального рівня, де важливо точно ідентифікувати межі угідь і внутрішню структуру територій [17].

На цьому тлі супутникова місія Sentinel-2 займає особливе місце у системі моніторингу земельних і водних ресурсів. Поєднання високої просторової роздільності, регулярності знімання та відкритого доступу до даних зумовило широке використання Sentinel-2 у наукових дослідженнях і практичних роботах з оцінки стану рослинного покриву, сільськогосподарських угідь та водних об'єктів [6], [18].

Наявність мультиспектральних каналів дозволяє розраховувати широкий спектр індексів, що забезпечує кількісну оцінку природних змін і спрощує порівняльний аналіз у часі. Одним із найпоширеніших інструментів супутникового моніторингу є спектральні індекси, зокрема NDVI та NDWI, які

активно застосовуються для оцінки стану рослинності та водних ресурсів. У міжнародних дослідженнях NDVI використовується для аналізу продуктивності рослинного покриву, виявлення деградаційних процесів, наслідків посух та змін у структурі землекористування [9], [10], [14]. Водночас NDWI широко застосовується для ідентифікації водних об'єктів, оцінки зволоженості територій, визначення змін площі водної поверхні та динаміки берегових ліній [11], [13].

Практика використання цих індексів показує їхню високу ефективність для аналізу просторово-часових змін, однак більшість досліджень зосереджується або на одному показнику, або на окремому часовому зрізі. Це обмежує можливість комплексної оцінки взаємозв'язку між змінами рослинності та водного режиму території, особливо в регіонах зі складними гідрологічними умовами [19], [23].

Окремі дослідження спрямовані на вдосконалення методів моніторингу шляхом поєднання спектральних індексів з геоінформаційними технологіями. Застосування зональної статистики, маскування хмарності та порівняльного картографування дозволяє підвищити точність аналізу та мінімізувати вплив випадкових факторів на результати досліджень [16], [24]. Водночас у багатьох роботах залишається проблемою адаптація загальних методик до локальних умов конкретних територій, де важливими є дрібномасштабні просторові відмінності та специфіка землекористування.

Таким чином, аналіз сучасних підходів до супутникового моніторингу свідчить, що найбільш перспективними є методи, які поєднують високоякісні супутникові дані Sentinel-2 з комплексним використанням індексів NDVI та NDWI та інструментів геоінформаційного аналізу. Саме такий підхід дозволяє одночасно оцінювати стан рослинності й водних ресурсів, виявляти критичні ділянки змін та забезпечувати просторово обґрунтовані висновки для завдань землеустрою та раціонального використання територій. Зазначені положення стали методичною основою для практичної частини даної магістерської роботи, у якій реалізовано комплексний аналіз змін земельних і водних ресурсів на основі супутникових даних Sentinel-2.

## **2.2 Супутниковий моніторинг земельних ресурсів у міжнародній практиці**

У міжнародній практиці супутниковий моніторинг сільськогосподарських земель є одним із найпоширеніших напрямів застосування даних дистанційного зондування Землі. Основною метою таких досліджень є оцінювання стану рослинного покриву, продуктивності посівів, просторової

неоднорідності угідь та виявлення деградаційних процесів. Для вирішення цих завдань широко використовується індекс NDVI у поєднанні з багатоспектральними супутниковими даними, зокрема місії Sentinel-2, що забезпечує високу просторову деталізацію та регулярність спостережень [6], [18].

### **2.2.1 Міжнародний досвід моніторингу рослинного покриву на основі індексу NDVI**

Оглядові дослідження свідчать, що багатоспектральні дані супутника Sentinel-2 забезпечують високу інформативність для моніторингу рослинності завдяки поєднанню оптимальної просторової роздільної здатності та набору спектральних каналів, чутливих до біофізичних характеристик рослинного покриву.

Pettorelli зазначає, що NDVI широко застосовується для оцінювання сезонної динаміки рослинності, виявлення змін у структурі рослинного покриву та аналізу реакції екосистем на природні й антропогенні чинники. Автор наголошує, що інтерпретація значень NDVI має здійснюватися з урахуванням типу рослинності, фази вегетації та умов зволоження території [14].

Узагальнення міжнародного досвіду використання супутникових даних Sentinel-2 для моніторингу рослинного покриву свідчить про широке впровадження індексу NDVI у дослідженнях, присвячених оцінюванню стану земельних ресурсів. У оглядових наукових роботах підкреслюється, що застосування багатоспектральних знімків Sentinel-2 дозволяє аналізувати просторові особливості рослинності та її динаміку в різних природно-кліматичних умовах, що зумовлює зростання кількості відповідних досліджень у світовому масштабі [6].

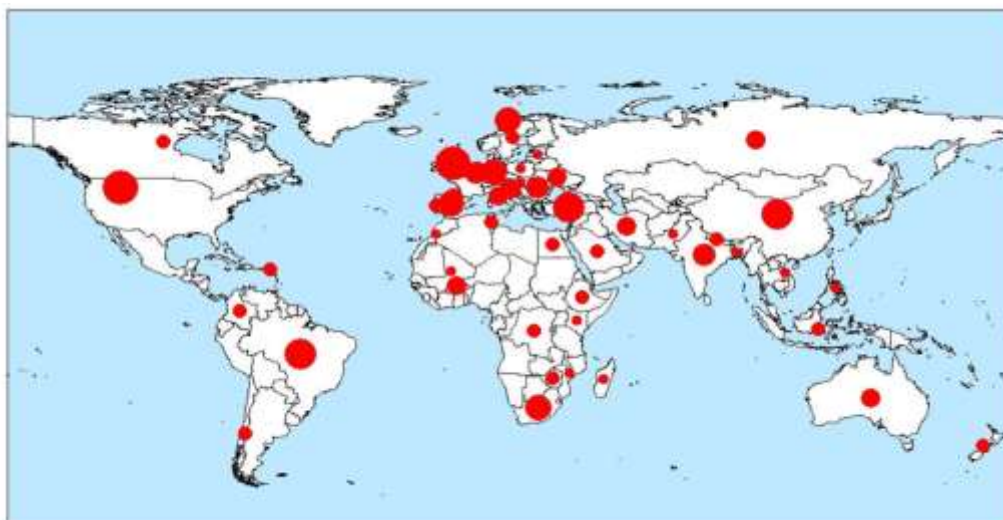


Рисунок 2.1 — Просторовий розподіл наукових досліджень, присвячених моніторингу земельного покриття та рослинності на основі супутникових даних Sentinel-2 у різних регіонах світу [6]

Наведений рисунок ілюструє глобальний характер застосування супутникових даних Sentinel-2 для моніторингу земельного покриття та рослинного стану. Концентрація наукових досліджень у різних регіонах світу підтверджує універсальність підходів, заснованих на використанні індексу NDVI, а також можливість їх адаптації до територій із різними природними та господарськими умовами. Отримані результати міжнародних досліджень створюють методичну основу для застосування аналогічних підходів у даній магістерській роботі з метою аналізу змін рослинного покриття досліджуваної території.

### **2.2.2 Аналіз змін земного покриття за багаточасовими супутниковими даними**

Одним із основних напрямків сучасного супутникового моніторингу земельних ресурсів є вивчення змін земного покриття на основі багаточасових спостережень. На відміну від одноразових або епізодичних оцінок, багаточасовий підхід дозволяє не лише визначити поточний стан території, але й відстежити динаміку змін у землекористуванні, процеси деградації та стійкі тенденції змін, викликані природними та антропогенними факторами. Цей підхід особливо важливий для завдань землеустрою, де необхідно враховувати зміни характеристик земель у часовому вимірі [16].

Влучним прикладом використання багаточасового супутникового аналізу є дослідження Wulder та його колег, у якому розглядаються можливості аналізу змін земного покриття на основі часових рядів супутникових даних [16]. Автори використовували послідовності супутникових знімків, отриманих у різні роки, для оцінки динаміки земельних ресурсів та виявлення стійких змін у структурі землекористування. У роботі підкреслюється, що багаточасовий аналіз дозволяє відокремити короточасні сезонні коливання від довготривалих змін, які мають важливе значення для управління територіями.

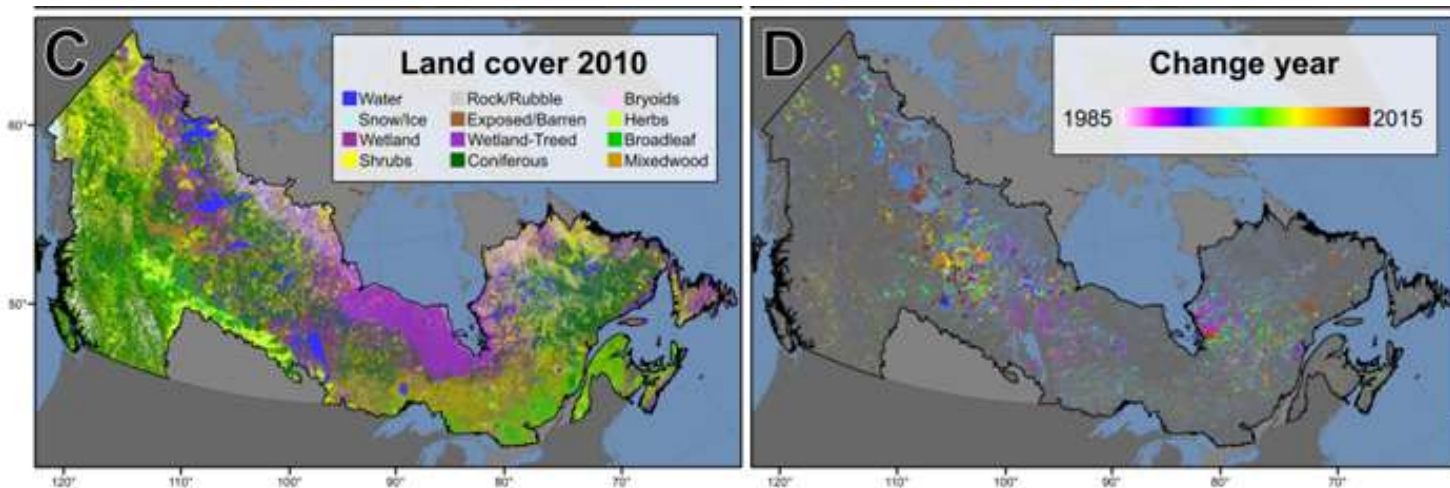


Рисунок 2.2 — Результати багаточасового супутникового аналізу змін земного покриття з відображенням року виникнення змін [16]

Наведені картографічні матеріали ілюструють можливості багаточасового супутникового аналізу для виявлення змін земного покриття та оцінювання їх просторово-часової динаміки. Панель С відображає стан земного покриття на визначений момент часу, тоді як панель D демонструє просторовий розподіл року виникнення змін, що дозволяє простежити еволюцію землекористування впродовж тривалого періоду спостережень. Такий підхід дає змогу не лише фіксувати факт трансформації земного покриття, а й визначати часові межі її прояву, що є принципово важливим для аналізу динаміки земельних ресурсів [16].

Приклад, наведений у роботі Wulder та співавторів, підтверджує ефективність використання багаточасових супутникових даних для відокремлення стійких довготривалих змін від сезонних коливань стану території. Поєднання карт земного покриття за окремий рік із результатами аналізу змін у часі забезпечує більш обґрунтовану інтерпретацію просторових процесів та підвищує надійність оцінювання трансформацій земель [16].

Водночас представлений підхід орієнтований переважно на узагальнений аналіз змін земного покриття без детального врахування стану рослинності та водного режиму території. Це зумовлює доцільність подальшого розвитку методик моніторингу шляхом використання спектральних індексів і часових рядів супутникових даних, що дозволяє більш детально оцінювати характер і причини змін земельних ресурсів. Саме такі підходи розглядаються у наступному підрозділі даної магістерської роботи.

### 2.2.3 Моніторинг сільськогосподарських земель на основі часових рядів NDVI та сучасних аналітичних підходів

Подальший розвиток супутникового моніторингу земельних ресурсів у міжнародній практиці пов'язаний із використанням часових рядів спектральних індексів, зокрема NDVI, що дозволяє аналізувати динаміку стану рослинного покриву протягом вегетаційного періоду та міжрічні зміни. На відміну від одночасових оцінок або порівняння окремих дат знімання, часові ряди NDVI забезпечують більш глибоке розуміння фенологічних особливостей рослинності та дають змогу відокремлювати природні сезонні коливання від стійких змін, зумовлених кліматичними або антропогенними чинниками.

Показовим прикладом сучасного підходу до аналізу часових рядів NDVI є дослідження, представлене у матеріалах ISPRS Geospatial Week 2025, у якому багаточасові супутникові знімки Sentinel-2 використовувалися для моніторингу сільськогосподарських земель на основі аналізу фенологічних стадій культур [26]. У роботі автори сформувавши часові ряди NDVI для різних типів рослинності та продемонстрували можливість їх використання для підвищення точності картографування сільськогосподарських угідь.

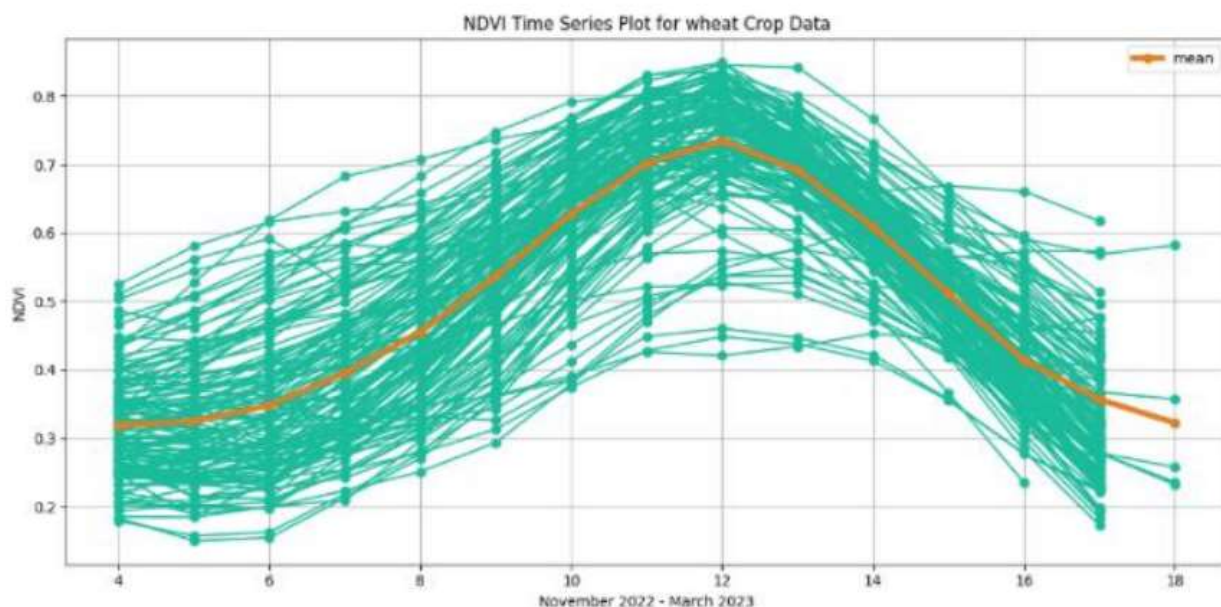


Рисунок 2.3 — Динаміка значень індексу NDVI протягом вегетаційного періоду за даними Sentinel-2 [26]

Графік часових рядів індексу NDVI наочно ілюструє можливості аналізу змін стану рослинного покриву протягом вегетаційного періоду, використовуючи багаточасові супутникові дані. Зміни значень NDVI з часом відображають фенологічні фази розвитку сільськогосподарських культур, що дозволяє відрізнити природні сезонні коливання від стійких змін, викликаних кліматичними умовами або антропогенними факторами. Такий підхід забезпечує більш інформативну оцінку стану земельних ресурсів у порівнянні з аналізом окремих дат знімання [26].

У цьому дослідженні аналіз часових рядів NDVI поєднується з методами машинного навчання та наземними спостереженнями, що підвищує точність класифікації, але ускладнює практичне застосування методики на територіях з обмеженим доступом до польових даних.

Тому для прикладних завдань землеустрою доцільно використовувати більш універсальні підходи, засновані на порівняльному аналізі часових рядів NDVI та просторовому аналізі в середовищі геоінформаційних систем без складних алгоритмів машинного навчання. Ці положення обґрунтовують вибір методики, реалізованої у практичній частині даної магістерської роботи, де аналіз змін стану рослинного покриву здійснюється на основі часових рядів NDVI у поєднанні з оцінкою змін водного режиму території за індексом NDWI, що забезпечує комплексний підхід до моніторингу земельних і водних ресурсів.

## **2.3 Супутниковий моніторинг водних ресурсів у міжнародній практиці**

### **2.3.1 Використання індексу NDWI для ідентифікації та моніторингу водних об'єктів**

У міжнародній практиці супутникового моніторингу водних ресурсів одним із найбільш розповсюджених методів є застосування спектральних індексів, призначених для виокремлення відкритої водної поверхні. Серед них особливе значення має індекс NDWI (Normalized Difference Water Index), який активно використовується для ідентифікації водних об'єктів, аналізу їхнього просторового поширення та оцінки змін площі водної поверхні за даними дистанційного зондування Землі [11].

Класичне визначення індексу NDWI було запропоноване McFeeters, який аргументував доцільність застосування зеленого та ближнього інфрачервоного спектральних діапазонів для посилення відбиття водних поверхонь і послаблення сигналу від рослинності та ґрунтів [11]. Подальший розвиток

цього підходу отримав у працях Ху, де запропоновано змінений варіант NDWI з використанням середнього інфрачервоного діапазону, що дало змогу збільшити точність виділення відкритої води, особливо в умовах важких прибережних зон [13].

Використання індексу NDWI разом із багатоспектральними даними Sentinel-2 дає змогу оперативно й автоматизовано картографувати водні об'єкти на різних просторових рівнях. У світових дослідженнях уже доведено, що NDWI вправно застосовується для виявлення річок, ставків, водосховищ та непостійних водойм, а також для оцінки змін їхньої площі у різні пори року [11], [13]. Створені на основі NDWI мапи дають змогу наочно представляти просторовий устрій водної поверхні та зручні для подальшого геоінформаційного аналізу.

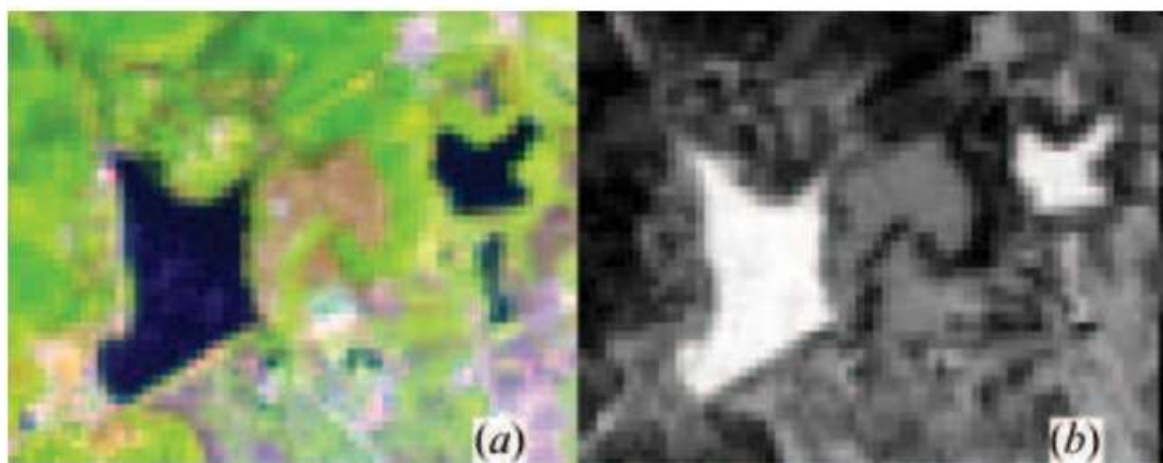


Рисунок 2.4 — Порівняння результатів виділення водних об'єктів за індексами NDWI та MNDWI на основі супутникових даних Landsat [13].

Наведене порівняння результатів виділення водних об'єктів за індексами NDWI та MNDWI наочно демонструє вплив вибору спектральних діапазонів на якість ідентифікації відкритої водної поверхні. Як видно з рисунка, модифікований індекс MNDWI забезпечує більш чітке відокремлення водних об'єктів від навколишніх типів земного покриття, зокрема в умовах складних прибережних зон та урбанізованих територій, де класичний NDWI може давати змішані або спотворені результати [13].

Отримані результати підтверджують доцільність використання модифікованих варіантів індексу NDWI для підвищення точності супутникового моніторингу водних ресурсів. Водночас міжнародний досвід свідчить, що ефективність застосування NDWI та MNDWI значною мірою залежить від характеристик досліджуваної території, типу водного об'єкта та

умов знімання, що потребує обережної інтерпретації отриманих картографічних матеріалів.

Таким чином, індекс NDWI та його модифікації є ефективним інструментом для ідентифікації водних об'єктів і первинного аналізу їх просторового поширення. Для оцінювання динаміки водної поверхні у часі та врахування сезонних і міжрічних змін доцільним є використання багаточасових супутникових даних, що дозволяє перейти від одночасових оцінок до комплексного моніторингу водних ресурсів. Зазначені підходи розглядаються у наступному підпідрозділі даної роботи.

### **2.3.2 Аналіз динаміки водних об'єктів за багаточасовими супутниковими даними**

Сучасні підходи до моніторингу водних ресурсів ґрунтуються на аналізі багаточасових супутникових даних, що дозволяє досліджувати просторово-часову динаміку водних об'єктів у довгостроковій перспективі. Такий підхід є особливо актуальним для оцінювання змін площі водної поверхні, коливань рівня води та виявлення наслідків природних і антропогенних впливів.

У міжнародній науковій практиці значна увага приділяється використанню супутникових часових рядів для аналізу змін водних об'єктів. Зокрема, Rekel та ін. продемонстрували можливості багаточасового аналізу супутникових знімків для картографування динаміки поверхневих вод та виявлення довгострокових тенденцій їх змін. Автори підкреслюють, що послідовний аналіз супутникових даних дозволяє відокремлювати стабільні водні об'єкти від тимчасових затоплень і сезонних коливань водної поверхні [19].

У міжнародних дослідженнях багаточасовий супутниковий аналіз широко використовується для оцінювання довгострокових змін площі поверхневих вод. Застосування тривалих часових рядів супутникових спостережень дозволяє виявляти глобальні та регіональні тенденції динаміки водних об'єктів, а також оцінювати вплив природних і антропогенних чинників на водний режим територій [19].

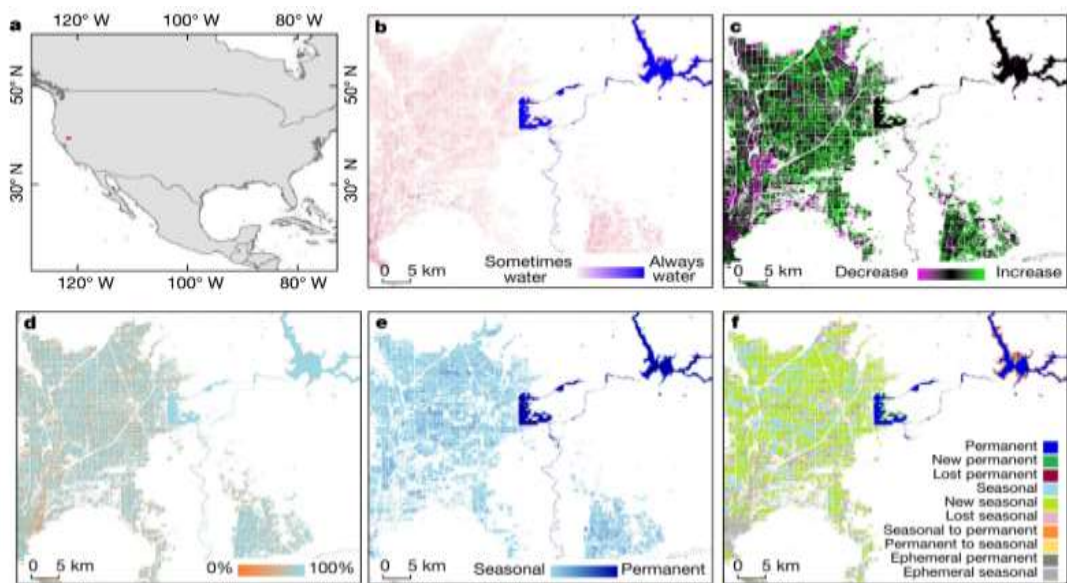


Рисунок 2.5— Глобальна динаміка змін площі поверхневих вод за багаточасовими супутниковими даними [19]

Наведений рисунок демонструє можливості багаточасового аналізу супутникових даних для виявлення змін площі поверхневих вод у глобальному масштабі. Поєднання просторової візуалізації та часових графіків дозволяє простежити як довгострокові тенденції, так і міжрічні коливання водної поверхні, що підтверджує ефективність супутникового моніторингу для аналізу динаміки водних ресурсів.

### 2.3.3 Виявлення екологічних та антропогенних змін водних об'єктів за радіолокаційними супутниковими даними

Поряд із застосуванням оптичних супутникових даних Sentinel-2 для моніторингу водних ресурсів у міжнародній та вітчизняній практиці активно використовуються радіолокаційні дані, зокрема супутника Sentinel-1. Радіолокаційні методи дистанційного зондування ґрунтуються на реєстрації відбитого мікрохвильового сигналу та мають суттєву перевагу — незалежність від умов освітлення та хмарності, що є критично важливим для моніторингу водних об'єктів у складних метеорологічних умовах.

Показовим прикладом використання радіолокаційних знімків Sentinel-1 для виявлення антропогенних змін водних об'єктів є дослідження Кухтара, присвячене аналізу нафтових розливів на водній поверхні з використанням даних SAR у середовищі EO Browser [20]. У роботі продемонстровано можливість ідентифікації ділянок із порушеною структурою водної поверхні,

що проявляється у зниженні інтенсивності зворотного радіолокаційного розсіювання, характерного для зон нафтового забруднення.



Рисунок 2.6 — Виявлення розливів нафтопродуктів на водній поверхні за радіолокаційними знімками супутника Sentinel-1 [20]

Результати, представлені в дослідженні, показують, що радіолокаційні знімки можуть швидко виявляти антропогенні зміни у стані водних об'єктів навіть за відсутності оптичних даних. Це робить Sentinel-1 ефективним інструментом для екологічного моніторингу, особливо коли використання оптичних супутникових даних обмежене через хмарність або несприятливі погодні умови.

Однак використання радіолокаційних даних має певні обмеження. Інтерпретація SAR-знімків вимагає спеціалізованих знань, а спектральні ознаки антропогенних змін можуть збігатися з природними явищами, такими як хвилювання водної поверхні або зміни вітрового режиму. Тому результати радіолокаційного аналізу доцільно розглядати разом з даними оптичного діапазону та іншими джерелами інформації [20].

Таким чином, міжнародний і вітчизняний досвід свідчить, що радіолокаційні дані Sentinel-1 є важливим доповненням до оптичних даних

Sentinel-2 у завданнях моніторингу водних ресурсів. Комплексне використання різних типів супутникової інформації дозволяє підвищити надійність виявлення екологічних та антропогенних змін водних об'єктів.

Водночас для завдань аналізу просторово-часової динаміки водної поверхні та оцінки змін водного режиму території доцільно використовувати оптичні дані Sentinel-2 у поєднанні з індексами NDWI та NDVI, що реалізовано у практичній частині даної магістерської роботи.

#### **2.4 Обґрунтування вибору методу супутникового моніторингу для оцінювання змін водної поверхні та рослинного покриву**

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що для моніторингу змін водної поверхні та рослинного покриву широко застосовуються різні підходи супутникового спостереження, зокрема спектральні індекси, багаточасовий аналіз, методи машинного навчання, радарні дані та хмарні платформи обробки зображень. Однак вибір конкретного методу дослідження залежить від поставленої мети, доступності даних, необхідного рівня деталізації результатів та можливості їх подальшого практичного використання.

У межах даної магістерської роботи обрано підхід, що ґрунтується на використанні багаточасових супутникових даних Sentinel-2 рівня обробки L2A у поєднанні зі спектральними індексами NDVI та NDWI та їх подальшою обробкою у середовищі геоінформаційних систем. Такий підхід дозволяє не лише візуально зафіксувати просторові зміни водної поверхні та рослинного покриву, але й здійснити їх кількісну оцінку з визначенням площ окремих класів і аналізом динаміки у часі.

Варто зазначити, що на етапі отримання супутникових знімків сучасні онлайн-сервіси, зокрема EO Browser, надають можливість швидкої візуалізації індексів NDVI та NDWI. Проте такий інструмент має переважно оглядовий характер і не забезпечує повноцінного наукового аналізу. Онлайн-візуалізація не дозволяє здійснювати детальну класифікацію, коректний розрахунок площ, аналіз відсоткових співвідношень між класами, а також контроль усіх параметрів обробки даних. Натомість завантаження супутникових знімків і їх обробка у середовищі ГІС забезпечують відтворюваність результатів, прозорість методики та можливість подальшого використання отриманих даних у прикладних задачах землеустрою.

Обґрунтування вибору саме спектральних індексів NDVI та NDWI зумовлене їх високою інформативністю та широким застосуванням у дослідженнях динаміки природних компонентів території. Як показано у

сучасних оглядових роботах, ці індекси є ефективними проксі-показниками для оцінювання стану рослинного покриву та наявності поверхневої води, особливо за умов багаточасового аналізу [40]. Вони дозволяють фіксувати не лише стабільні об'єкти, але й тимчасові зміни, що є принципово важливим для дослідження наслідків гідрологічних катастроф.

Застосування супутникових даних Sentinel-2 у даному дослідженні є методично обґрунтованим з огляду на їх просторову розрізненість, спектральні характеристики та регулярність зйомки. Поєднання 10-метрової просторової роздільної здатності з високою частотою повторних спостережень дозволяє ефективно аналізувати як просторові, так і часові зміни водної поверхні та рослинного покриву. Це особливо важливо для територій, що зазнали різких порушень гідрологічного режиму, де необхідно відстежувати еволюцію змін протягом кількох років.

Використання геоінформаційного середовища QGIS у поєднанні з ручовою обробкою супутникових даних забезпечує повний контроль над методикою дослідження. Такий підхід дозволяє адаптувати алгоритми обробки до конкретних умов досліджуваної території, обирати оптимальні порогові значення індексів, здійснювати просторову класифікацію та виконувати точний розрахунок площ класів. На відміну від автоматизованих або хмарних рішень, цей підхід є прозорим і легко відтворюваним, що відповідає вимогам наукових досліджень [39].

Особливої актуальності обраний метод набуває у контексті аналізу наслідків підриву Каховської ГЕС. За умов масштабного порушення гідрологічного режиму важливим є не лише виявлення змін водної поверхні, але й оцінювання їх впливу на прилеглі території та рослинний покрив. Комплексне використання індексів NDVI та NDWI дозволяє простежити взаємозв'язок між змінами зволоження та реакцією рослинності, а також відокремити тимчасові водні об'єкти від стабільних елементів ландшафту.

Таким чином, обраний у роботі підхід до супутникового моніторингу є методично обґрунтованим, відтворюваним та придатним для практичного застосування. Він поєднує переваги спектральних індексів, багаточасового аналізу та геоінформаційних технологій і забезпечує отримання кількісних результатів, необхідних для оцінювання наслідків гідрологічних катастроф та подальшого використання у завданнях землеустрою та просторового планування [38]–[40].

## Розділ 3 Оцінювання наслідків порушення гідрологічного режиму території за супутниковими даними Sentinel-2

### 3.1 Передумови та наслідки підриву Каховської ГЕС для гідрологічного режиму Півдня України

Каховська гідроелектростанція протягом десятиліть відігравала ключову роль у формуванні гідрологічного режиму нижньої течії Дніпра та прилеглих територій Півдня України. Створене внаслідок її функціонування Каховське водосховище забезпечувало регулювання стоку, стабілізацію рівнів води, водопостачання населених пунктів і зрошувальних систем, а також формування специфічних прибережних і заплавної ландшафтів. За таких умов гідрологічний режим території характеризувався відносною стабільністю, чітко сформованою береговою лінією та наявністю розвинених перехідних зон зволоження.

Підриу Каховської ГЕС у 2023 році призвів до раптового руйнування цієї штучно сформованої системи регулювання водного балансу. У результаті відбулося різке та неконтрольоване вивільнення значних об'ємів води, що спричинило масштабні гідрологічні зміни як у межах колишнього водосховища, так і на значній частині Півдня України. Супутникові дані, отримані в перші тижні після катастрофи, зафіксували одночасне затоплення низинних ділянок і подальше стрімке осушення акваторії водосховища, що є характерною ознакою руйнування великих гідротехнічних споруд [41].



а)

б)

Рисунок 3.1 – Супутникові знімки території Каховського водосховища до (а) та після (б) підриву ГЕС [43]

Передумови таких масштабних змін зумовлені антропогенним характером формування гідрологічного режиму регіону. Як зазначається у фундаментальних дослідженнях, штучні гідроспоруди змінюють природну

динаміку річкових систем, створюючи крихку рівновагу, порушення якої призводить до різких і часто незворотних наслідків для водного середовища та прилеглих ландшафтів [42]. У випадку Каховської ГЕС ця рівновага була зруйнована миттєво, що зумовило каскадні гідрологічні ефекти.

Наслідки підриву проявилися у докорінній трансформації гідрологічного режиму Півдня України. По-перше, відбулося різке зниження рівня води на значних площах колишнього водосховища, що призвело до оголення донних відкладів і втрати стабільної водної поверхні. По-друге, у перші місяці після аварії зафіксовано формування численних тимчасових і фрагментованих водних об'єктів — підтоплених понижень, застійних водойм і заболочених ділянок, які мали нестійкий характер і значно змінювалися в часі [41]. Така мозаїчність водної поверхні є типовою для посткатастрофічних ландшафтів і ускладнює традиційні методи оцінювання змін.

Крім безпосередніх змін водної поверхні, катастрофа суттєво вплинула на зволоження прилеглих територій і стан ґрунтово-рослинного покриву. Втрата регулюючої функції водосховища призвела до порушення водного балансу, що проявилось у скороченні перехідних зон зволоження, деградації заплавних ландшафтів та зміні умов росту рослинності. Офіційні оцінки екологічних наслідків підриву Каховської ГЕС свідчать про довготривалий характер цих змін і відсутність швидкого повернення до доаварійного стану [43].

Особливістю ситуації є те, що гідрологічні наслідки катастрофи мають не лише локальний, але й регіональний масштаб. Зміни режиму зволоження вплинули на сільськогосподарські угіддя, природні екосистеми та систему землекористування загалом. У цьому контексті традиційні наземні спостереження є недостатніми для повної оцінки просторово-часової динаміки змін, що зумовлює необхідність застосування супутникових методів моніторингу.

Супутникові дані дозволяють об'єктивно зафіксувати як початкову фазу катастрофи, так і подальшу еволюцію водної поверхні та зволоження територій у часі. Особливо інформативним є порівняльний аналіз стану території до підриву ГЕС і в післяаварійний період, що створює основу для кількісної оцінки масштабів трансформації гідрологічного режиму [41], [42]. Саме тому використання багаточасових супутникових знімків у поєднанні зі спектральними індексами є доцільним інструментом для дослідження наслідків даної катастрофи.

Таким чином, підрив Каховської ГЕС став ключовим фактором, що зумовив докорінні зміни гідрологічного режиму Півдня України. Поєднання

швидких і довготривалих наслідків, просторової неоднорідності змін та порушення взаємозв'язку між водною поверхнею і рослинним покривом потребує комплексного підходу до аналізу. У межах цієї роботи таким підходом є використання супутникових даних Sentinel-2 і спектральних індексів NDVI та NDWI, що дозволяє перейти від загального опису катастрофи до детального кількісного аналізу змін на конкретній території дослідження.

### **3.2 Характеристика території дослідження та обґрунтування її вибору**

Територією дослідження у даній роботі обрано локальну ділянку в районі с. Новоберислав Херсонської області, що охоплює прибережну частину нижньої течії Дніпра та прилеглі до неї суходільні території. Межі досліджуваної території задано у вигляді довільного полігону, сформованого з урахуванням фактичного просторового поширення гідрологічних змін після підриву Каховської ГЕС (рис. 3.2). Загальна площа полігону становить 1128,051 га.



Рисунок 3.2 – Розташування та межі досліджуваної території в районі с. Новоберислав

Обраний полігон охоплює ділянки з різним характером земної поверхні та землекористування, зокрема водні об'єкти, прибережні зони,

сільськогосподарські угіддя та забудовані території населеного пункту. Така конфігурація дозволяє аналізувати зміну водної поверхні та зволоження не ізольовано, а у взаємозв'язку з прилеглими суходільними ділянками, що є принципово важливим для оцінювання наслідків порушення гідрологічного режиму.

Форма полігону не є геометрично правильною або адміністративно зумовленою, що є свідомим методичним рішенням. Його межі адаптовано до реальних природних і антропогенних особливостей території, зокрема конфігурації берегової лінії, заплавних понижень та зон потенційного затоплення й подальшого осушення. Такий підхід дозволяє мінімізувати включення площ, які не зазнали безпосереднього впливу гідрологічних змін, і зосередити аналіз на найбільш чутливих ділянках.

Вибір саме локальної, відносно невеликої території дослідження, на відміну від аналізу всієї площі колишнього Каховського водосховища, є методично обґрунтованим. Масштабні дослідження великих акваторій доцільні для загальної оцінки наслідків катастрофи, однак вони часто не дозволяють детально простежити просторову неоднорідність змін і локальні процеси трансформації ландшафту. Натомість аналіз обмеженого полігону забезпечує вищу просторову деталізацію результатів і дає змогу коректно інтерпретувати зміни індексів NDVI та NDWI у різні роки.

Обрана територія в районі с. Новоберислав є показовою також з огляду на поєднання в межах одного полігону зон, які до підриву Каховської ГЕС перебували під прямим або опосередкованим впливом водосховища, та ділянок, що функціонували як суходіл. Це створює сприятливі умови для аналізу як скорочення відкритої водної поверхні, так і змін зволоження та реакції рослинного покриву на різку трансформацію гідрологічного режиму.

Крім того, локальний масштаб дослідження має прикладне значення для землеустрою та просторового планування. Саме на рівні окремих ділянок, подібних до обраного полігону, приймаються рішення щодо подальшого використання земель, оцінювання екологічних ризиків і можливостей відновлення територій після катастрофічних подій. Отримані результати можуть бути використані як репрезентативний приклад для аналізу аналогічних прибережних зон Півдня України.

Таким чином, вибір досліджуваної території в районі с. Новоберислав є свідомим і науково обґрунтованим. Локальний полігон дозволяє детально проаналізувати просторово-часову динаміку змін водної поверхні та рослинного покриву після підриву Каховської ГЕС і створює основу для

подальшого кількісного аналізу супутникових індексів NDVI та NDWI, результати якого наведено у наступних підрозділах.

### **3.3 Методика отримання та обробки супутникових даних Sentinel-2**

У даній магістерській роботі для дослідження змін водної поверхні та рослинного покриву використано багаточасові супутникові дані місії Sentinel-2 програми Copernicus. Методика дослідження ґрунтується на послідовному виконанні етапів відбору супутникових знімків, їх попередньої обробки, розрахунку спектральних індексів NDVI та NDWI (у модифікованій формі), класифікації результатів і підготовки просторових та кількісних показників до подальшого аналізу в середовищі геоінформаційних систем.

Отримання та відбір супутникових знімків. Вихідними даними дослідження слугували супутникові знімки Sentinel-2 рівня обробки Level-2A, які містять значення відбивної здатності земної поверхні, скориговані з урахуванням атмосферних впливів. Використання продуктів рівня L2A є методично обґрунтованим для багаточасового аналізу, оскільки вони забезпечують коректність міжрічних порівнянь та мінімізують вплив атмосферних факторів на результати розрахунку спектральних індексів [45].

Супутникові знімки було відібрано для 2021, 2023 та 2025 років, що дозволяє охарактеризувати стан території до підриву Каховської ГЕС, у післяаварійний період та на етапі подальших змін гідрологічного режиму. Для кожного року здійснювався відбір сцен із мінімальною хмарністю, переважно не більше 5–10 %, що є особливо важливим для аналізу водних поверхонь і прибережних зон. Додатково враховувалася сезонна близькість дат зйомки з метою зменшення впливу фенологічних відмінностей рослинного покриву на результати дослідження.

Для розрахунку спектральних індексів у роботі використано спектральні канали Sentinel-2, які мають найбільшу інформативність щодо стану рослинності та зволоження поверхні. До аналізу залучено такі канали:

- Band 3 (Green, 560 нм, 10 м) — зелений спектральний діапазон;
- Band 4 (Red, 665 нм, 10 м) — червоний спектральний діапазон;
- Band 8 (NIR, 842 нм, 10 м) — ближній інфрачервоний діапазон;
- Band 11 (SWIR, 1610 нм, 20 м) — короткохвильовий інфрачервоний діапазон.

Залучення каналу Band 11 (SWIR) є принципово важливим для аналізу водної поверхні, оскільки вода характеризується низькою відбивною

здатністю у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні. Це дозволяє ефективніше відокремлювати відкриту воду від зволжених ґрунтів і рослинності, що є особливо актуальним для територій із порушеним гідрологічним режимом.

Попередня обробка даних у середовищі QGIS .Обробка супутникових знімків виконувалася у програмному середовищі QGIS 3.32, яке є відкритою геоінформаційною системою та широко застосовується у наукових дослідженнях з дистанційного зондування Землі та просторового аналізу [44]. Усі етапи обробки виконувалися з дотриманням єдиних параметрів для всіх часових зрізів.

На першому етапі знімки було перепроєктовано у систему координат UTM, зона 36N (EPSG:32636), що забезпечує коректність просторових і площинних вимірювань для території дослідження. Далі виконано приведення просторової розрізненості каналів до  $10 \times 10$  м. Оскільки канал Band 11 має початкову просторову роздільну здатність 20 м, перед розрахунком індексу NDWI було виконано його ресемплінг до 10 м з метою узгодження з іншими використаними каналами.

Наступним кроком стало обрізання (clip) супутникових знімків за межами досліджуваного полігону, сформованого в районі с. Новоберислав. Такий підхід дозволив обмежити аналіз лише територією, що зазнала безпосереднього впливу змін гідрологічного режиму після підриву Каховської ГЕС, та уникнути включення нерелевантних площ.

Розрахунок спектральних індексів NDVI та NDWI.Розрахунок спектральних індексів здійснювався за допомогою інструменту Raster Calculator у середовищі QGIS. Для оцінювання стану рослинного покриву та змін водної поверхні використано індекси NDVI та NDWI, які є базовими показниками у дистанційному зондуванні Землі [13].

Індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) розраховувався за формулою:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

де B8 — Band 8 (NIR), B4 — Band 4 (Red).

У рамках даного дослідження для аналізу змін водної поверхні використано модифікований варіант нормалізованого диференційного водного індексу NDWI, адаптований до умов досліджуваної території після різкої трансформації гідрологічного режиму. На відміну від класичного варіанта

індексу, запропонованого McFeeters, у роботі застосовано спектральні канали Sentinel-2, що забезпечують підвищену чутливість до змін вологості поверхні та тимчасово оголених ділянок дна. Застосування модифікованого підходу не змінює концептуальної суті індексу NDWI, а спрямоване на покращення інтерпретації просторово-часової динаміки водної поверхні в умовах посткатастрофних змін. Формула розрахунку має вигляд:

$$NDWI = \frac{B3 - B11}{B3 + B11}$$

де B3 — Band 3 (Green), B11 — Band 11 (SWIR).

Застосування модифікованого індексу NDWI дозволяє зменшити вплив рослинності та вологих ґрунтів на результати аналізу та забезпечує більш надійне виділення відкритої води в умовах нестабільного гідрологічного режиму.

Класифікація значень індексів і підготовка кількісних показників. Для подальшої інтерпретації результати розрахунку індексів NDVI та NDWI було класифіковано на п'ять класів із фіксованими діапазонами значень. Класифікація NDVI використовувалася для оцінки стану та щільності рослинного покриву, тоді як класифікація NDWI — для розмежування сухих поверхонь, зволжених ділянок і зон відкритої води. Відповідні діапазони значень індексів і їх інтерпретація наведені у таблицях 3 та 4.

Таблиця 3 — Класифікація значень індексу NDVI для оцінки стану рослинного покриву

№ класу (DN)	Діапазон значень NDVI	Характеристика поверхні	Характеристика рослинного покриву
1	-1,0 – 0,0	Водні поверхні, оголений ґрунт	Відсутність рослинності або дуже низька фотосинтетична активність
2	0,0 – 0,2	Сухі ґрунти, деградовані ділянки	Дуже слабка рослинність, поодинокі рослинні угруповання
3	0,2 – 0,4	Напівприродні та агроландшафти	Розріджена рослинність із помірною фотосинтетичною активністю

4	0,4 – 0,6	Сільськогосподарські угіддя, луки	Середньо розвинена рослинність зі стабільною фотосинтетичною активністю
5	0,6 – 1,0	Заплавні екосистеми, зрошувані угіддя	Щільна, добре розвинена рослинність із високою фотосинтетичною активністю

Таблиця 4 — Класифікація значень індексу NDWI для оцінки зволоження поверхні та водних об'єктів

№ класу (DN)	Діапазон значень NDWI	Характеристика поверхні	Гідрологічна інтерпретація
1	-1,0 – 0,0	Сухі поверхні, оголений ґрунт, забудовані території	Відсутність поверхневої вологи або її мінімальна кількість; характерно для сухих ґрунтів і антропогенно трансформованих ділянок
2	0,0 – 0,2	Слабо зволожені території	Поверхні з незначною вологістю, можливі перехідні зони між сухими та зволоженими ділянками
3	0,2 – 0,4	Зволожені поверхні	Території з підвищеним рівнем ґрунтової вологи, заплавні ділянки, зволожені сільськогосподарські угіддя
4	0,4 – 0,6	Дуже зволожені поверхні	Ділянки з високим ступенем зволоження, прибережні зони, мілководдя та підтоплені території
5	0,6 – 1,0	Відкрита водна поверхня	Стійкі водні об'єкти: річки, водосховища, затоплені площі з постійною наявністю води

Після класифікації растрові результати було перетворено у векторний формат шляхом полігонізації. Для кожного класу виконано розрахунок площ у гектарах, що стало основою для формування зведених таблиць і побудови діаграм. Отримані кількісні показники використано для просторово-часового

порівняльного аналізу змін у 2021, 2023 та 2025 роках, результати якого подано у наступних підрозділах 3.4 та 3.5.

Таким чином, наведена методика отримання та обробки супутникових даних Sentinel-2 забезпечує системний, відтворюваний та науково обґрунтований підхід до оцінювання змін водної поверхні та рослинного покриття після підриву Каховської ГЕС і створює методичну основу для подальшого аналізу результатів.

### **3.4 Аналіз змін рослинного покриття за індексом NDVI**

Оцінка стану та динаміки рослинного покриття є одним із ключових елементів аналізу екологічних змін територій, що зазнали суттєвого антропогенного та техногенного впливу. У межах даного дослідження для кількісної та просторової оцінки змін рослинності в районі с. Новоберислав використано нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI, який широко застосовується у світовій практиці дистанційного зондування Землі для аналізу біофізичних характеристик рослинного покриття [27–29]. Картографічні матеріали індексів NDVI та NDWI наведено в основному тексті роботи в узагальненому вигляді. Для детальнішого візуального аналізу ці самі карти подано в додатках у більшому масштабі.

У даному дослідженні аналіз NDVI проведено для трьох часових зрізів — 2021, 2023 та 2025 років — що дозволяє простежити трансформацію рослинного покриття до руйнування Каховської ГЕС, у перехідний період та на етапі формування нового гідрологічного режиму після катастрофи.

Просторовий розподіл рослинного покриття у 2021 році :

Аналіз карти NDVI за 2021 рік (рис. 3.1) свідчить про сформований і відносно стабільний характер рослинного покриття в межах досліджуваного полігону. Значення індексу демонструють чітку просторову диференціацію, що відображає різні типи поверхні та ступінь розвитку рослинності, характерні для даного регіону до різкої зміни гідрологічного режиму.

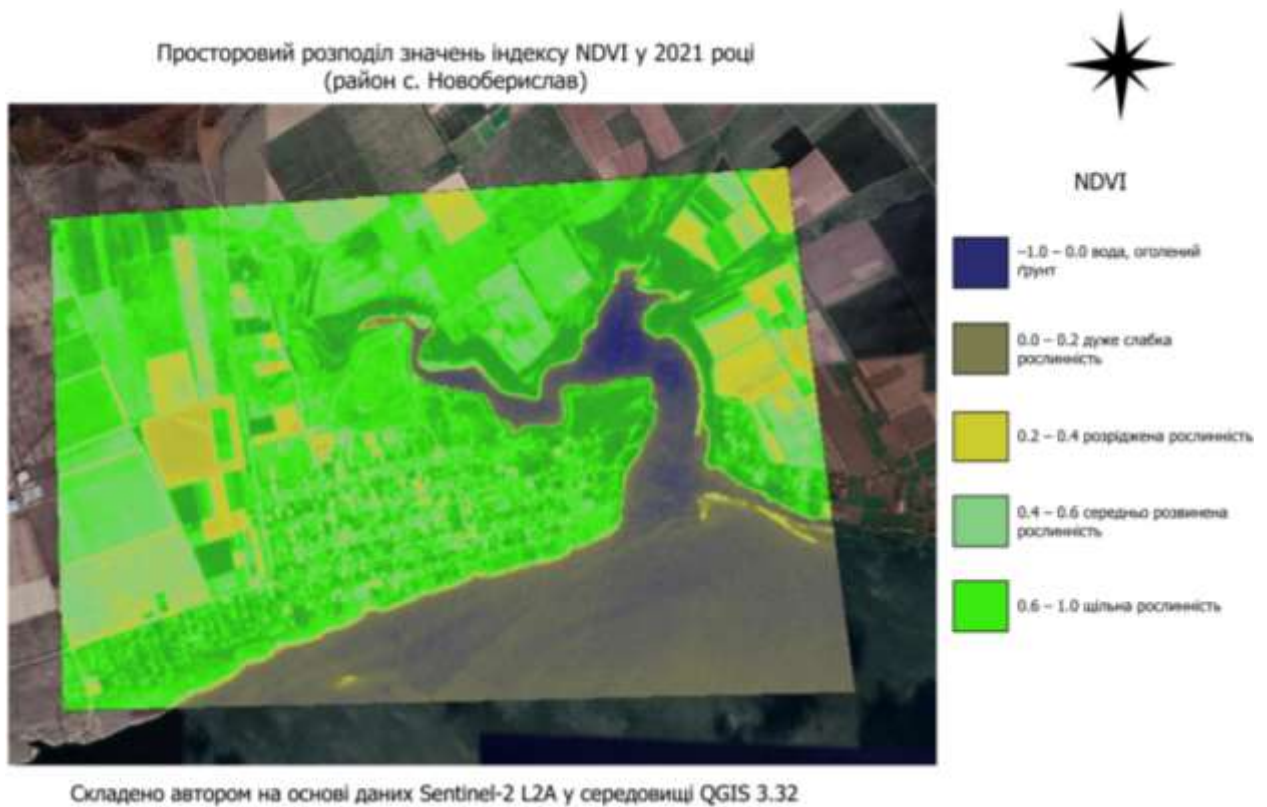


Рисунок 3.1

Найнижчі значення NDVI (негативні або близькі до нуля) просторово приурочені до водних поверхонь та перезволожених ділянок. На карті вони формують компактні або витягнуті зони, що відповідають акваторії водосховища, прибережним смугам та окремим пониженням ділянкам рельєфу. Такі значення індексу є типовими для поверхонь, де фотосинтетична активність практично відсутня, що узгоджується з фізичним змістом NDVI та результатами інших досліджень, виконаних на основі супутникових даних Sentinel-2 [14], [15].

Зони зі значеннями NDVI у межах 0,0–0,2 охоплюють ділянки з відкритим або частково оголеним ґрунтом, а також території з дуже розрідженою рослинністю. На карті 2021 року ці площі, як правило, розташовані на периферії водних об'єктів або в межах територій із нестійким зволоженням. Їх просторове положення свідчить про перехідний характер таких поверхонь між водним середовищем та зонами зі сформованим рослинним покривом, що є типовим для заплавної і прибережних ландшафтів [9], [10].

Переважаючу частину досліджуваної території у 2021 році займають ділянки зі значеннями NDVI у межах 0,2–0,4. Ці значення відповідають слабко або середньо розвиненій рослинності, зокрема трав'янистим угрупованням, перелогам та сільськогосподарським угіддям на ранніх або проміжних стадіях вегетації. Просторово ці ділянки формують відносно суцільні масиви, що

свідчить про достатню зволоженість і відсутність різких порушень у структурі рослинного покриву на момент зйомки.

Високі значення NDVI (0,4–0,6) локалізуються у вигляді окремих осередків або компактних зон, що відповідають ділянкам з добре розвиненою рослинністю. У межах досліджуваного полігону вони приурочені до сільськогосподарських угідь у фазі активної вегетації або до природних ділянок із густим травостоєм. Просторовий характер таких зон свідчить про стабільні умови вологозабезпечення та високу інтенсивність фотосинтетичної активності рослинного покриву [27], [28].

Найвищі значення NDVI (понад 0,6) займають обмежені за площею, але чітко виражені ділянки. Вони є індикаторами максимальної біомаси та щільності рослинності й відображають найбільш продуктивні екосистеми в межах полігону. Наявність таких зон у 2021 році свідчить про сприятливі екологічні умови та відносну збалансованість природних і господарських процесів на території до початку масштабних гідрологічних змін.

Загалом, карта NDVI за 2021 рік відображає фоновий, доаварійний стан рослинного покриву, що характеризується чіткою просторовою структурою та наявністю стабільних зон з різним рівнем вегетаційної активності. Отриманий розподіл індексу NDVI може бути використаний як базовий рівень для подальшого порівняльного аналізу змін рослинного покриву у 2023 та 2025 роках з метою оцінювання впливу трансформації гідрологічного режиму на стан території [29], [30].

Зміни рослинного покриву у 2023 році :

Карта NDVI за 2023 рік (рис. 3.2) демонструє суттєві відмінності порівняно з допідривним періодом, що свідчить про глибоку трансформацію рослинного покриву досліджуваної території. Візуально найбільш помітною особливістю є різка зміна конфігурації зон з низькими значеннями NDVI, які у попередні роки відповідали суцільній водній поверхні та стабільним прибережним ділянкам.

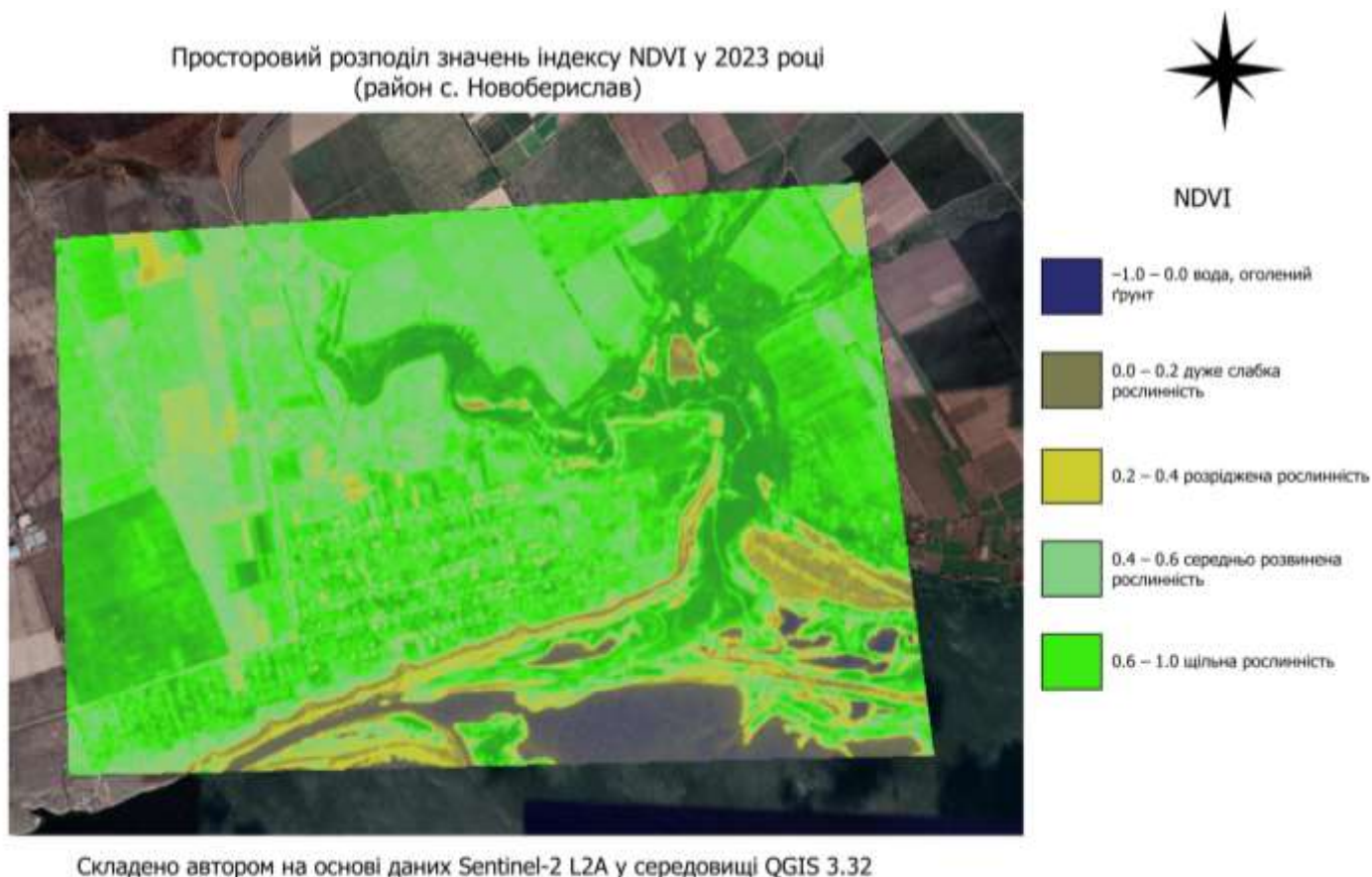


Рисунок 3.2

На карті 2023 року значення NDVI, близькі до нуля або від’ємні, вже не формують великих компактних масивів. Натомість вони представлені фрагментованими та нерівномірно розподіленими ділянками, що просторово приурочені до руслових частин, залишкових водойм та локальних понижень рельєфу. Така картина є характерною для територій, де відбулося різке порушення гідрологічного режиму, а водна поверхня зазнала значного скорочення [14], [15].

Площі зі значеннями NDVI у межах 0,0–0,2 у 2023 році істотно розширюються та утворюють широкі перехідні зони між залишковими водними об’єктами та ділянками зі сформованою рослинністю. Просторово ці зони часто охоплюють території колишньої акваторії водосховища та прилеглі заплавні ділянки. Візуальний характер розподілу цього класу є мозаїчним, що свідчить про нестабільність рослинного покриву та різноманітність умов зволоження, властивих початковому етапу вторинного заростання.

Значення NDVI в інтервалі 0,2–0,4 у 2023 році формують строкатий просторовий рисунок. Ці ділянки відображають розріджену або середньо

розвинену рослинність, яка почала формуватися на оголених поверхнях після зниження рівня води. На карті вони не утворюють суцільних масивів, а розташовуються у вигляді плям і смуг, що чергуються з зонами слабкої рослинності. Такий характер просторового розподілу є типовим для територій, що перебувають у стані екологічної перебудови [9], [10].

Ділянки з підвищеними значеннями NDVI (0,4–0,6) у 2023 році зберігаються, проте їх просторове розміщення зазнає змін. Вони локалізуються переважно на територіях, де зволоження залишалось відносно стабільним або де здійснювалося господарське використання із застосуванням агротехнічних заходів. Візуально ці зони стають менш компактними, що свідчить про порушення цілісності рослинних масивів і початок процесів фрагментації.

Найвищі значення NDVI (понад 0,6) у 2023 році представлені обмеженими за площею осередками, які мають чітку локалізацію. Порівняно з 2021 роком, такі ділянки втрачають суцільність і концентруються у найбільш сприятливих умовах зволоження. Їх збереження можна пояснити або локальним впливом залишкових водних ресурсів, або специфікою землекористування, що підтримує інтенсивну вегетацію [27], [28].

Узагальнюючи візуальний аналіз карти NDVI за 2023 рік, можна зазначити, що рослинний покрив досліджуваної території перебуває у перехідному, нестабільному стані. Просторовий розподіл індексу характеризується підвищеною мозаїчністю, фрагментацією зон з високою вегетаційною активністю та розширенням площ зі слабкою рослинністю. Така картина є прямим наслідком різкої зміни гідрологічного режиму та створює основу для подальших змін, які простежуються на карті NDVI за 2025 рік [29], [30].

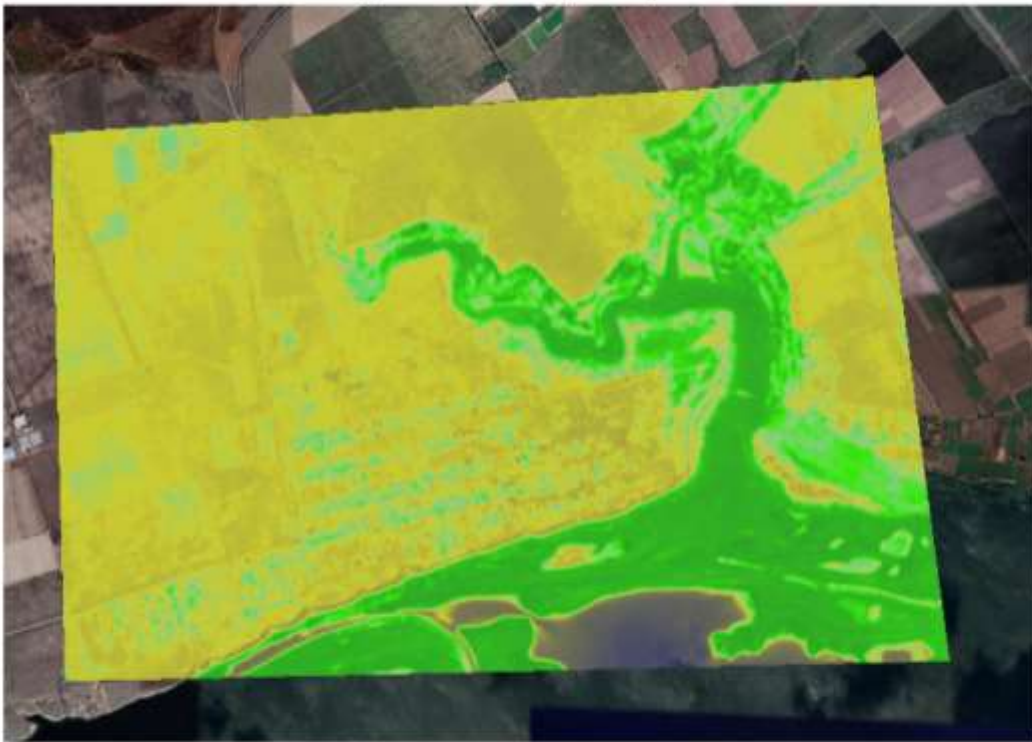
Стан рослинного покриву у 2025 році :

Аналіз просторового розподілу NDVI у 2025 році (рис. 3.3) відображає подальший розвиток трансформацій рослинного покриву, зафіксованих у 2023 році, та формування нового просторово-екологічного стану досліджуваної території. Візуально помітно, що структура рослинного покриву у 2025 році суттєво відрізняється від допідривного періоду та характеризується іншими закономірностями просторової організації.

Просторовий розподіл значень індексу NDVI у 2025 році  
(район с. Новоберислав)



NDVI



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Рисунок 3.3

Ділянки з найнижчими значеннями NDVI (негативні або близькі до нуля) у 2025 році мають обмежене поширення та приурочені переважно до руслових частин водотоків, локальних понижень рельєфу та залишкових водойм. Порівняно з 2023 роком, ці зони виглядають більш стабільними за конфігурацією, що свідчить про припинення різких змін водного режиму та формування нового рівноважного стану водної поверхні. Водночас їх площа значно менша, ніж у 2021 році, що візуально підтверджує довготривале скорочення водних площ [14], [15].

Найбільш поширеними на карті NDVI за 2025 рік є значення індексу в межах 0,0–0,2, які формують великі, просторово однорідні масиви. Ці ділянки відповідають територіям зі слабкою або нестійкою рослинністю, що сформувалася на колишніх водних та перезволожених поверхнях. Візуально вони охоплюють значну частину колишньої акваторії водосховища та прилеглих заплавних зон, що свідчить про переважання процесів вторинного заростання з низькою біомасою та обмеженою фотосинтетичною активністю [9], [10].

Значення NDVI у діапазоні 0,2–0,4 у 2025 році формують перехідні пояси між зонами слабкої рослинності та локальними осередками більш інтенсивної вегетації. Просторово ці ділянки розташовуються нерівномірно, часто у вигляді плям або смуг, що свідчить про мозаїчний характер рослинного покриву. Така структура є типовою для територій, де відбувається адаптація рослинності до нових гідрологічних умов, але ще не сформувався стабільний рослинний покрив [27], [28].

Ділянки з підвищеними значеннями NDVI (0,4–0,6) у 2025 році значно скорочуються порівняно з 2023 роком та мають чітку локалізацію. Вони зосереджені переважно на територіях із відносно сприятливими умовами зволоження, зокрема поблизу водотоків або на ділянках, де зберігається або відновлюється сільськогосподарське використання. Візуально ці зони виглядають фрагментованими та не утворюють суцільних масивів, що свідчить про обмежені можливості підтримання інтенсивної вегетації в умовах зміненого водного режиму.

Найвищі значення NDVI (понад 0,6) у 2025 році представлені поодинокими, невеликими за площею осередками. Їх просторове положення чітко прив'язане до найбільш сприятливих мікроумов, де поєднуються достатнє зволоження та відповідні ґрунтові умови. Порівняно з 2021 роком, такі ділянки втратили свою просторову цілісність, що візуально свідчить про зниження загальної продуктивності рослинного покриву та зменшення площ високобіомасних екосистем [29], [30].

Загалом карта NDVI за 2025 рік демонструє стабілізацію нового просторового стану рослинного покриву, який сформувався після різкої гідрологічної трансформації. Хоча на території відбуваються процеси вторинного заростання, їх характер свідчить про переважання слабо розвиненої та розрідженої рослинності. Це дозволяє зробити висновок, що у 2025 році досліджувана територія перебуває на етапі формування нового екологічного балансу, який суттєво відрізняється від допідривного стану та характеризується зниженим рівнем вегетаційної активності [27]–[30].

**Кількісне підтвердження візуально зафіксованих змін рослинного покриву.** Виконаний візуальний аналіз карт NDVI за 2021, 2023 та 2025 роки дозволив виявити загальні просторові закономірності трансформації рослинного покриву досліджуваної території, зокрема скорочення площ із високою вегетаційною активністю, зростання мозаїчності рослинного покриву та розширення зон зі слабкою або нестійкою рослинністю. Однак для науково обґрунтованої оцінки масштабів і напрямів цих змін необхідне кількісне підтвердження отриманих візуальних спостережень.

З цією метою значення індексу NDVI для кожного з досліджуваних років було класифіковано на п'ять інтервалів, що відповідають різним типам поверхні та ступеню розвитку рослинності. Такий підхід дає змогу перейти від якісного аналізу картографічних матеріалів до кількісної оцінки змін, вираженої у площах окремих класів NDVI. Класифікація за фіксованими інтервалами забезпечує коректність порівняння результатів між різними часовими зрізами та дозволяє простежити динаміку рослинного покриву в однаковій шкалі оцінювання [14], [15].

Розрахунок площ кожного класу NDVI виконано в середовищі QGIS шляхом просторово-статистичної обробки класифікованих растрових даних у межах досліджуваного полігону. Отримані значення площ відображають фактичне співвідношення різних типів рослинного покриву та поверхні у 2021, 2023 та 2025 роках і дозволяють об'єктивно оцінити, які саме класи зазнали найбільших змін унаслідок трансформації гідрологічного режиму території.

Узагальнені результати кількісного аналізу площ класів NDVI наведено в таблиці 5, де подано порівняльні показники для трьох часових зрізів, а також відображено напрям змін площ кожного класу відносно попереднього періоду. Для наочного відображення виявлених тенденцій побудовано стовпчасту діаграму (рис. 3.4), яка дозволяє візуально порівняти структуру рослинного покриву за різні роки та чітко ідентифікувати класи NDVI, що зазнали найбільш істотних змін.

Таким чином, подальший аналіз таблиці та стовпчастої діаграми дає змогу не лише підтвердити візуально зафіксовані просторові зміни, але й кількісно охарактеризувати динаміку рослинного покриву в районі с. Новоберислав упродовж 2021–2025 років. Виявлені тенденції узгоджуються з результатами міжнародних досліджень, присвячених оцінюванню змін рослинного покриву після масштабних гідрологічних порушень, зокрема аварій на гідротехнічних спорудах та різких змін водного режиму території, де дистанційне зондування

Землі розглядається як ключовий інструмент довгострокового екологічного моніторингу [31], [32].

Таблиця 5 – Порівняльна оцінка площ класів NDVI за 2021–2023–2025 роки

Клас NDVI	Інтервал значень NDVI	Характеристика поверхні	Площа 2021, га	Площа 2023, га	Площа 2025, га
1	-1.0 – 0.0	Вода, оголений ґрунт	293,39	67,58 ↓	34,76 ↓
2	0.0 – 0.2	Дуже слабка рослинність	45,26	64,78 ↑	455,50 ↑
3	0.2 – 0.4	Розріджена рослинність	385,29	148,95 ↓	312,88 ↑
4	0.4 – 0.6	Середньо розвинена рослинність	137,27	465,33 ↑	78,85 ↓
5	0.6 – 1.0	Щільна рослинність	265,23	379,85 ↑	244,50 ↓

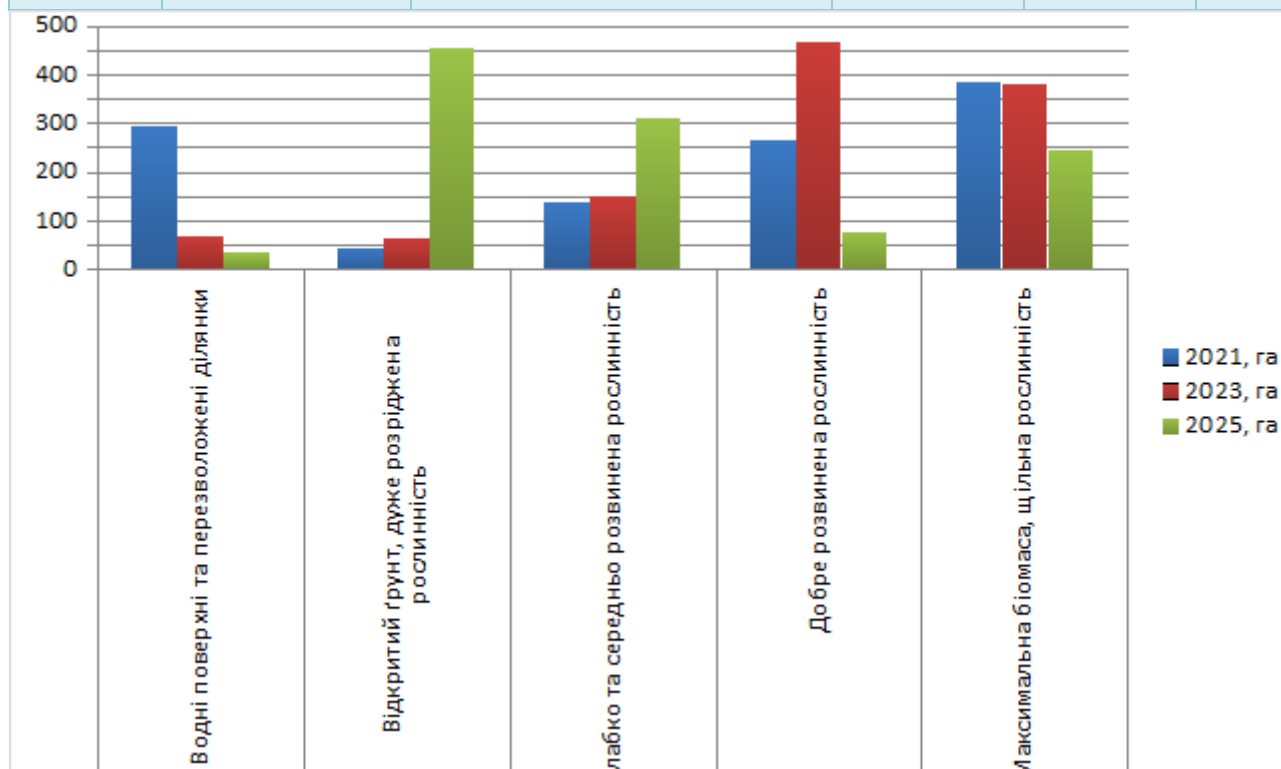


Рисунок 3.4 – Динаміка площ класів NDVI у районі с. Новоберислав у 2021–2025 роках

Кількісна оцінка динаміки NDVI за 2021–2025 роки.

Кількісний аналіз площ класів NDVI (табл. 5 ) та їх порівняння на стовпчастій діаграмі (рис. 3.4) свідчать про істотну трансформацію рослинного покриву досліджуваної території у 2021–2025 роках. Зміни мають системний характер і відображають перехід від водно-домінованого та високопродуктивного стану до переважання перехідних і слабо розвинених типів рослинності.

У 2021 році структура покриву характеризувалася значною часткою водної поверхні (26,0 %) та високопродуктивної рослинності з  $NDVI > 0,60$  (34,2 %), що відповідає стабільному гідрологічному режиму до руйнування Каховської ГЕС. Частка середньо розвиненої рослинності (0,40–0,60) становила 23,5 %, тоді як перехідні та деградовані класи займали порівняно незначні площі.

У 2023 році відбулося різке скорочення водної поверхні до 6,0 %, що кількісно підтверджує втрату акваторії водосховища. Одночасно зафіксовано зростання частки середньо розвиненої рослинності до 41,3 %, що відображає короточасну активізацію вегетаційних процесів на звільнених від води територіях. Частка перехідних класів (0,20–0,40) також зросла до 13,2 %, що свідчить про початковий етап вторинного заростання.

У 2025 році тенденція до скорочення водної поверхні зберігається (3,1 %), тоді як найбільш помітною є структурна перебудова рослинного покриву. Частка перехідних класів  $NDVI$  0,20–0,40 зросла до 27,7 %, що вказує на формування мозаїчного, нестабільного рослинного покриву. Водночас площа високопродуктивної рослинності ( $NDVI > 0,60$ ) зменшилася до 21,7 %, що свідчить про зниження загальної біомаси та продуктивності екосистем.

Загалом за період 2021–2025 років відбулося скорочення площ водної поверхні більш ніж у 8 разів та зменшення частки високопродуктивної рослинності на понад 12 %, при одночасному зростанні площ перехідних і слабо розвинених класів  $NDVI$ . Отримані кількісні результати узгоджуються з міжнародними дослідженнями, у яких супутникові індекси  $NDVI$  застосовуються для оцінювання довготривалих екологічних наслідків масштабних гідрологічних порушень і аварій на гідротехнічних спорудах [27]–[32].

Виконаний аналіз просторово-часової динаміки індексу  $NDVI$  за 2021, 2023 та 2025 роки дозволив комплексно оцінити зміни рослинного покриву в районі с. Новоберислав у контексті різкої трансформації гідрологічного режиму після руйнування Каховської ГЕС. Поєднання картографічного

аналізу та кількісної оцінки площ класів NDVI забезпечило науково обґрунтоване підтвердження виявлених тенденцій.

Встановлено, що у допідривний період (2021 рік) структура території характеризувалася значною часткою водної поверхні та високопродуктивної рослинності, що відповідало стабільному режиму зволоження. У 2023 році зафіксовано різке скорочення площ водної поверхні та істотний перерозподіл класів NDVI, що свідчить про швидку реакцію рослинного покриву на зміну гідрологічних умов. Кількісні показники цього періоду відображають початковий етап адаптації екосистеми, пов'язаний із вторинним заростанням звільнених від води територій.

У 2025 році просторово-структурна організація рослинного покриву набула ознак відносної стабілізації, однак із чітким зниженням частки високопродуктивної рослинності та переважанням перехідних і слабо розвинених класів NDVI. Це свідчить про формування нового екологічного стану території, який відрізняється нижчим рівнем біомаси та загальної вегетаційної активності порівняно з допідривним періодом.

Таким чином, індекс NDVI продемонстрував високу інформативність для виявлення та кількісного аналізу змін рослинного покриву в умовах масштабних гідрологічних порушень. Отримані результати узгоджуються з міжнародними дослідженнями, у яких супутникові індекси широко застосовуються для моніторингу екологічних наслідків аварій на гідротехнічних спорудах та довготривалої перебудови природних ландшафтів [27]–[32].

### **3.5 Аналіз змін водної поверхні та зволоження території за індексом NDWI**

Індекс NDWI широко використовується у сучасних дослідженнях дистанційного зондування Землі для ідентифікації водної поверхні, оцінки ступеня зволоження територій та аналізу змін гідрологічного режиму. Його застосування особливо ефективно для прибережних зон, заплав і територій, що зазнали різких антропогенних впливів, оскільки дозволяє фіксувати як відкриту воду, так і перехідні стани між сухими та зволеними поверхнями [33], [37].

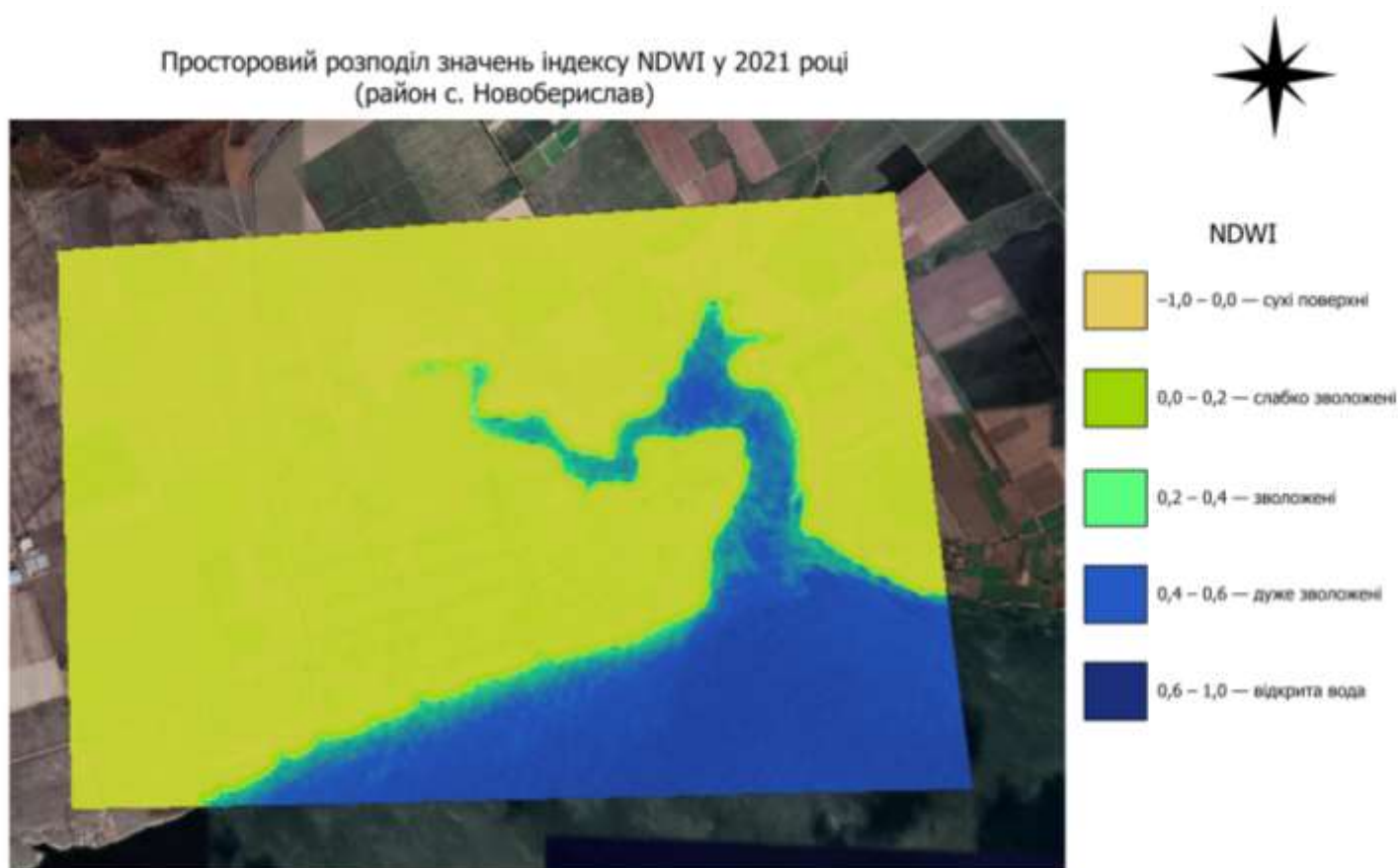
Використання багатоспектральних знімків Sentinel-2 у поєднанні з індексом NDWI забезпечує достатню просторову деталізацію для аналізу локальних змін водного режиму, що підтверджується результатами численних міжнародних досліджень [33], [34]. Для територій, де відбулося руйнування гідротехнічних споруд, NDWI є одним із ключових індикаторів трансформації

ландшафту, оскільки дозволяє простежити динаміку підтоплення, осушення та деградації водно-наземних екосистем [35].

У контексті дослідження території с. Новоберислав застосування NDWI є обґрунтованим з огляду на різку зміну гідрологічного режиму після підриву Каховської ГЕС. Аналіз просторового розподілу значень індексу у 2021–2025 роках дозволяє оцінити не лише короточасні наслідки гідрологічного порушення, але й процеси подальшої стабілізації або деградації зволжених територій.

Просторовий розподіл значень NDWI у 2021 році :

Карта просторового розподілу значень індексу NDWI за 2021 рік (рис. 3.5) відображає сформований і відносно стабільний характер водного режиму в межах досліджуваного полігону до різкої трансформації гідрологічних умов.



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Рисунок 3.5

Найнижчі значення NDWI (у межах  $-1,0-0,0$ ) просторово приурочені до сухих поверхонь, представлених орними землями та відкритими ґрунтами. На карті вони формують відносно суцільний фон у центральній та північній частинах полігону, що свідчить про домінування територій з мінімальним вологозабезпеченням. Такі значення індексу є типовими для поверхонь без

водної складової та узгоджуються з фізичним змістом NDWI, а також результатами досліджень, виконаних на основі супутникових даних Sentinel-2 [33], [37].

Зони зі значеннями NDWI у межах 0,0–0,2 охоплюють слабо зволожені ділянки, які просторово розташовані переважно на периферії водних об'єктів та в межах перехідних зон між суходолом і зволеними територіями. Їх просторове положення вказує на нестійкий характер зволоження, що є типовим для прибережних і заплавної ландшафтів за умов відносно стабільного гідрологічного режиму [36].

Ділянки зі значеннями NDWI у межах 0,2–0,4 відповідають зволеним поверхням і мають локальний характер поширення. На карті 2021 року вони формують витягнуті або компактні зони, просторово приурочені до понижених форм рельєфу та ділянок, що зазнають періодичного впливу поверхневих вод. Наявність таких зон свідчить про функціонування природних механізмів перерозподілу вологи та збереження водного балансу в межах досліджуваної території.

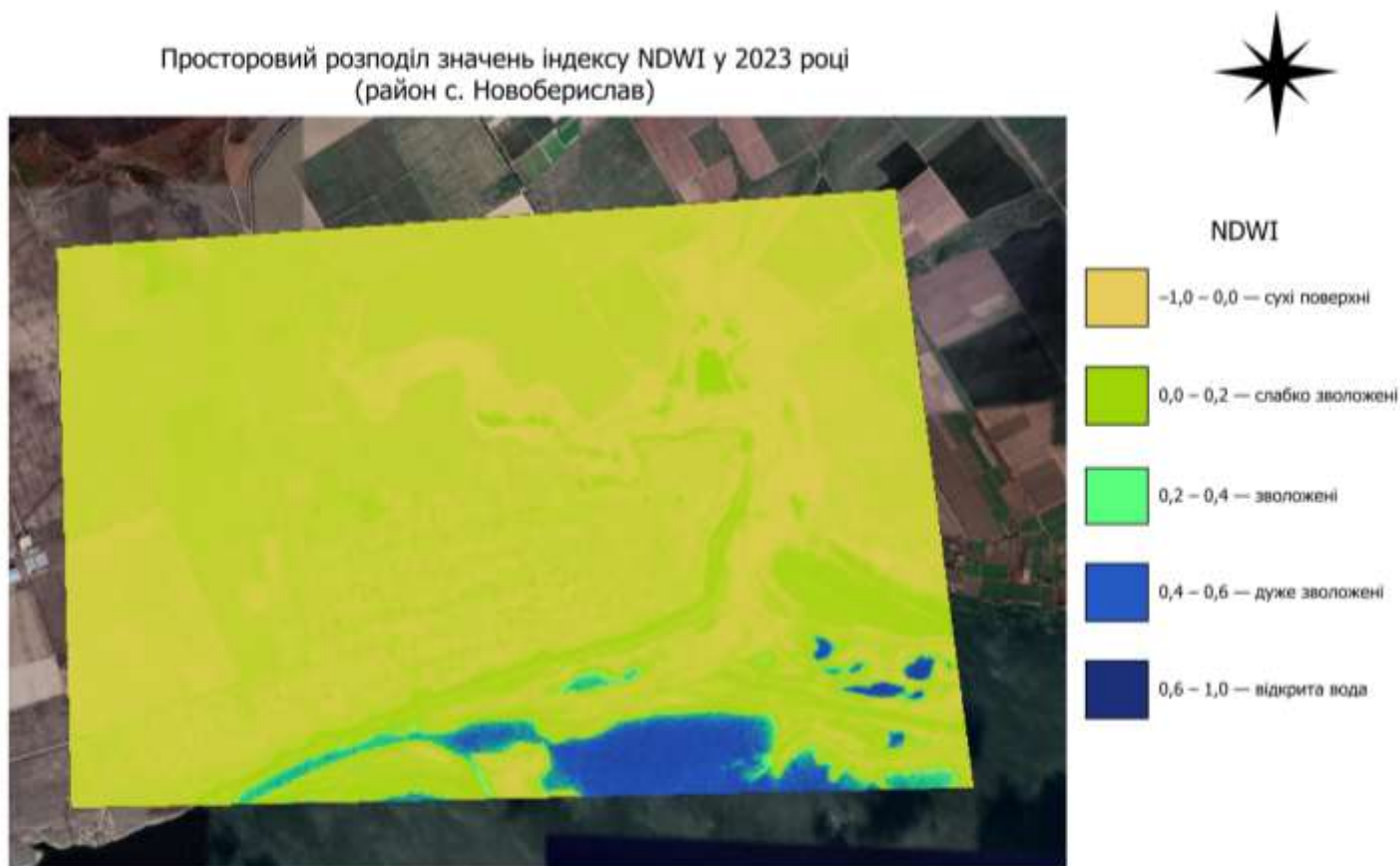
Значення NDWI у межах 0,4–0,6, що відповідають дуже зволеним поверхням, локалізуються переважно у прибережній частині полігону. Вони формують смугу, яка є перехідною між відкритою водною поверхнею та зволеними ділянками суші. Просторовий характер цих зон відображає сформовану заплавної структуру та стабільний вплив водного об'єкта на прилеглі території.

Найвищі значення NDWI (понад 0,6), що відповідають відкритій воді, чітко локалізуються вздовж берегової лінії та в межах акваторії водного об'єкта. Ці ділянки мають суцільну конфігурацію та чітко окреслені межі, що свідчить про стабільне існування водної поверхні у 2021 році. Просторовий розподіл таких значень є типовим для водосховищ і великих водних об'єктів та узгоджується з результатами міжнародних досліджень динаміки поверхневих вод [34].

Загалом, карта NDWI за 2021 рік відображає фоновий, доаварійний стан водного режиму території, що характеризується чіткою просторовою структурою, наявністю сформованої водної поверхні та перехідних зон з різним ступенем зволоження. Отриманий розподіл індексу NDWI може бути використаний як базовий рівень для подальшого порівняльного аналізу змін водної поверхні та зволоження території у 2023 та 2025 роках з метою оцінювання впливу трансформації гідрологічного режиму після підриву Каховської ГЕС [35], [36].

Просторовий розподіл значень NDWI у 2023 році :

Просторовий розподіл значень індексу NDWI за 2023 рік (рис. 3.6) свідчить про різку зміну характеру зволоження території та порушення сформованої раніше структури водної поверхні після підриву Каховської ГЕС.



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Рисунок 3.6

Найнижчі значення NDWI (у межах  $-1,0-0,0$ ), які відповідають сухим поверхням, у 2023 році займають переважаючу частину досліджуваної території. Просторово вони формують суцільний фон у центральній, північній та значній частині південної зони полігону. Таке різке розширення площ сухих поверхонь свідчить про масштабне осушення території та втрату стабільного водного впливу на прилеглі землі, що є типовою реакцією ландшафту на руйнування великої гідротехнічної споруди [35].

Зони зі значеннями NDWI у межах  $0,0-0,2$ , що відповідають слабо зволоженим поверхням, у 2023 році мають фрагментований характер поширення. Вони просторово приурочені до окремих понижених ділянок рельєфу та до територій уздовж колишніх руслових і заплавної елементів. Наявність таких зон свідчить про нерівномірний характер перерозподілу

вологи та формування локальних ділянок нестійкого зволоження, які не утворюють суцільних перехідних смуг між водою та сушею.

Ділянки зі значеннями NDWI у межах 0,2–0,4, що відповідають зволоженим поверхням, у 2023 році представлені окремими витягнутими або плямистими осередками. Вони чітко простежуються вздовж залишкових руслових форм і в місцях тимчасового накопичення води. Просторовий характер цих зон свідчить про деградацію заплавної структури та порушення природних механізмів збереження вологи, що раніше забезпечували плавний перехід від водної поверхні до суходолу [36].

Значення NDWI у межах 0,4–0,6, які характеризують дуже зволожені поверхні, у 2023 році мають обмежене поширення та не формують суцільної прибережної смуги, як це спостерігалось у 2021 році. Такі ділянки локалізуються переважно у південній частині полігону та відображають залишковий вплив водної маси на прилеглі території. Їх просторове розміщення є нерівномірним і фрагментованим, що вказує на нестабільний характер зволоження.

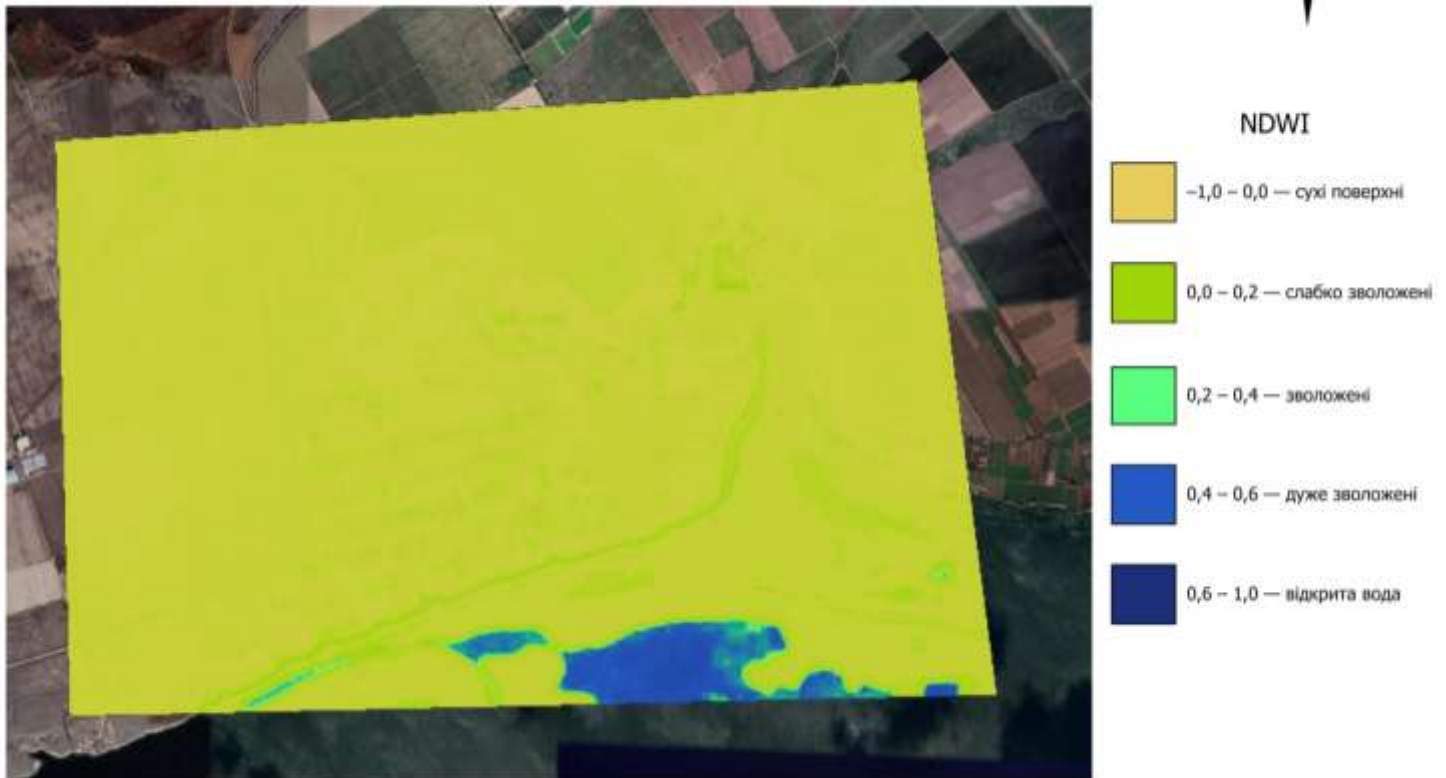
Найвищі значення NDWI (понад 0,6), які відповідають відкритій водній поверхні, у 2023 році представлені окремими локальними ділянками, переважно у прибережній частині території. На відміну від 2021 року, ці зони не утворюють суцільної водної акваторії, а мають розірвану, мозаїчну конфігурацію. Такий характер просторового розподілу відкритої води свідчить про різке порушення гідрологічної рівноваги та нестабільність водного режиму в період після руйнування Каховської ГЕС, що узгоджується з результатами міжнародних досліджень динаміки поверхневих вод у кризових умовах [34], [35].

Загалом, карта NDWI за 2023 рік відображає кризовий стан водного режиму території, що характеризується домінуванням сухих поверхонь, фрагментацією водної поверхні та деградацією перехідних зон зволоження.

Просторовий розподіл значень NDWI у 2025 році :

Отримані за 2025 рік значення індексу NDWI (рис. 3.7) відображають посткризовий етап розвитку водного режиму території та формування нового, відмінного від доаварійного, стану зволоження.

Просторовий розподіл значень індексу NDWI у 2025 році  
(район с. Новоберислав)



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Рисунок 3.7

Найнижчі значення NDWI (у межах  $-1,0-0,0$ ), що відповідають сухим поверхням, у 2025 році займають переважачу частину досліджуваної території. Просторово вони формують майже суцільний фон у центральній, північній та значній частині південної частини полігону. Порівняно з 2023 роком, ці зони характеризуються більш однорідним розподілом, що свідчить про закріплення процесів осушення та домінування територій із мінімальним рівнем вологозабезпечення. Такий характер розподілу є індикатором переходу від кризового стану до стабілізації нового, більш аридного режиму зволоження.

Зони зі значеннями NDWI у межах  $0,0-0,2$ , які відповідають слабо зволуженим поверхням, у 2025 році мають обмежене та фрагментоване поширення. Вони просторово приурочені переважно до окремих понижених ділянок рельєфу та до залишкових руслових елементів. На відміну від 2021 року, такі зони не формують виражених перехідних смуг, що свідчить про

втрату буферних територій між водними об'єктами та суходолом і зменшення ролі заплавлених ландшафтів у регулюванні водного балансу [36].

Ділянки зі значеннями NDWI у межах 0,2–0,4, що характеризують зволожені поверхні, у 2025 році представлені поодинокими осередками. Вони мають локальний характер і не утворюють просторово пов'язаних масивів, як це спостерігалось у доаварійний період. Такий розподіл свідчить про деградацію природних механізмів акумуляції та утримання вологи, а також про скорочення площ водно-наземних екосистем, що виконували функцію перехідної зони між відкритою водою та сухими поверхнями.

Значення NDWI у межах 0,4–0,6, які відповідають дуже зволеним поверхням, у 2025 році мають вкрай обмежене поширення. Вони локалізуються переважно у прибережній частині полігону та відображають залишковий вплив водної маси на прилеглі території. Просторовий характер таких зон свідчить про відсутність сформованої заплавної структури та нестабільність умов зволоження навіть у безпосередній близькості до водної поверхні.

Найвищі значення NDWI (понад 0,6), що відповідають відкритій воді, у 2025 році зосереджені в межах прибережної частини досліджуваної території та мають меншу площу порівняно з 2023 роком. Відкрита водна поверхня характеризується більш компактною, але обмеженою конфігурацією, що свідчить про відсутність відновлення довоєнного водного режиму. Такий просторовий розподіл узгоджується з результатами досліджень динаміки поверхневих вод, які вказують на тривалий характер гідрологічних змін після руйнування великих гідротехнічних об'єктів [34], [35].

Загалом, карта NDWI за 2025 рік відображає посткризовий етап розвитку водного режиму території, для якого характерне домінування сухих поверхонь, скорочення площ відкритої води та деградація перехідних зон зволоження. Отриманий просторовий розподіл індексу NDWI свідчить про формування нового, стійкого, але спрощеного гідрологічного стану ландшафту, який істотно відрізняється від доаварійного періоду та має бути врахований при подальшому земельпорядковому й екологічному аналізі [35], [36].

#### Кількісний аналіз змін класів NDWI

Кількісний аналіз змін площ класів індексу NDWI у 2021–2023–2025 роках виконано з метою об'єктивної оцінки трансформації водного режиму в межах досліджуваного полігону. Порівняльні значення площ класів NDWI наведено у табл. 6, а їх динаміка у часі відображена на рис. 3.8.

Таблиця 6 – Порівняльна оцінка площ класів NDWI за 2021–2023–2025 роки

Клас NDWI	Інтервал значень NDWI	Характеристика поверхні	Площа 2021, га	Площа 2023, га	Площа 2025, га
1	-1.0 – 0.0	Сухі поверхні	819,67	1046,55 ↑	1076,78 ↑
2	0.0 – 0.2	Слабо зволожені поверхні	278,13	7,37 ↓	4,25 ↓
3	0.2 – 0.4	Зволожені поверхні	7,43	8,08 ↑	4,74 ↓
4	0.4 – 0.6	Дуже зволожені поверхні	16,86	13,60 ↓	4,63 ↓
5	0.6 – 1.0	Відкрита вода	4,29	50,79 ↑	35,98 ↓

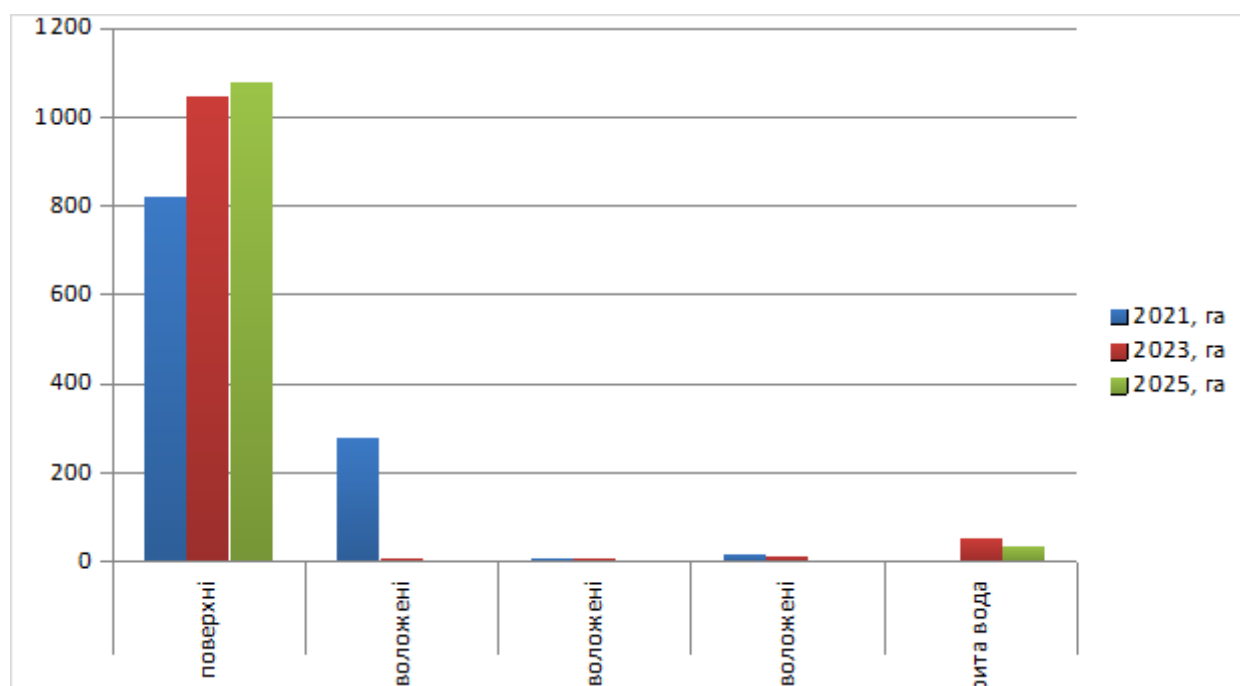


Рис. 3.8 – Динаміка площ класів NDWI у районі с. Новоберислав у 2021–2025 роках

У 2021 році домінуючим класом були сухі поверхні (NDWI -1,0–0,0), площа яких становила 819,67 га, або 72,7 % загальної площі полігону. Такий розподіл є типовим для доаварійного періоду та свідчить про стабільний гідрологічний режим із чітко локалізованою водною поверхнею та сформованими перехідними зонами. Частка слабо зволених поверхонь (NDWI 0,0–0,2) у 2021 році була значною і становила 278,13 га, або 24,7 %, що вказує на розвинену систему заплавної і прибережних ландшафтів. Інші класи

займали незначні площі: зволожені поверхні (0,2–0,4) — 0,7 %, дуже зволожені (0,4–0,6) — 1,5 %, а відкрита вода (0,6–1,0) — лише 0,4 % території.

У 2023 році спостерігаються різкі кількісні зміни у структурі класів NDWI, що відображають кризовий стан водного режиму після підриву Каховської ГЕС. Площа сухих поверхонь зросла до 1046,55 га, що становить 92,8 % площі полігону. Водночас площі слабо зволених поверхонь скоротилися майже повністю — до 7,37 га (0,7 %), що свідчить про руйнування перехідних зон між водою та суходолом. Частка зволених і дуже зволених поверхонь залишалася незначною — відповідно 0,7 % та 1,2 %. На цьому тлі різко зросла площа класу «відкрита вода», яка у 2023 році становила 50,79 га, або 4,5 % території. Збільшення цього показника не свідчить про розширення стабільної водної акваторії, а відображає формування численних тимчасових, мілководних і фрагментованих водних поверхонь у понижених формах рельєфу.

У 2025 році кількісні показники NDWI свідчать про подальшу стабілізацію зміненого водного режиму без повернення до доаварійного стану. Частка сухих поверхонь зросла до 1076,78 га, або 95,4 %, що вказує на закріплення процесів осушення території. Площі слабо зволених, зволених та дуже зволених поверхонь разом становлять менше 1,2 %, що підтверджує деградацію заплавлених і перехідних зон. Площа відкритої води у 2025 році зменшилася порівняно з 2023 роком і становила 35,98 га (3,2 %), однак залишалася суттєво більшою, ніж у 2021 році. Це свідчить про збереження локальних водних об'єктів і понижених ділянок із застійною водою в межах сформованого післяаварійного ландшафту.

Загалом, кількісний аналіз змін класів NDWI підтверджує, що трансформація водного режиму після підриву Каховської ГЕС має стійкий характер. Динаміка відсоткових співвідношень між класами свідчить не лише про зменшення площ стабільної водної поверхні, а й про втрату перехідних зон зволення та домінування сухих поверхонь. Зафіксоване у 2023 році зростання частки відкритої води є проявом кризової фази перерозподілу води, тоді як дані за 2025 рік відображають формування нового, більш аридного та просторово спрощеного гідрологічного стану території.

### **3.6 Узагальнення результатів дослідження та прикладні рекомендації щодо використання результатів**

Результати просторово-часового аналізу індексів NDVI та NDWI, отримані в межах даної магістерської роботи, дозволяють перейти від констатації наслідків підриву Каховської ГЕС до формування практично орієнтованих підходів щодо подальшого використання та відновлення трансформованих територій. Виявлені зміни водного режиму та стану рослинного покриву мають неоднорідний характер і проявляються по-різному в межах досліджуваного полігону, що потребує диференційованого підходу до управління земельними ресурсами.

Комплексне використання індексів NDVI та NDWI дало змогу простежити не лише зміну площ відкритої води чи деградацію рослинного покриву, а й взаємозв'язок між цими процесами. Наприклад, зони, де зафіксовано стійке зниження значень NDWI, у більшості випадків супроводжуються зменшенням значень NDVI, що свідчить про погіршення умов зволоження та зниження фотосинтетичної активності рослинності. Водночас на окремих ділянках з періодичним або локальним зволоженням спостерігається строката просторово-часова структура NDVI, що може вказувати на переформування рослинних угруповань або зміну типів землекористування.

Отримані карти NDWI дозволяють чітко ідентифікувати ділянки з різним ступенем зволоження, що є ключовим чинником при плануванні подальшого використання земель. Так, території зі стабільно низькими значеннями NDWI можуть розглядатися як зони ризику щодо подальшої деградації ґрунтів, особливо за умов інтенсивного сільськогосподарського використання. Для таких ділянок доцільно розглядати можливість зміни структури посівів або впровадження адаптивних агротехнологій.

У свою чергу, ділянки з підвищеними або нестабільними значеннями NDWI, які після катастрофи зазнають періодичного зволоження, можуть бути використані для формування екологічно стабільних зон. Наприклад, такі території доцільно включати до системи прибережних буферних смуг або використовувати для відновлення заплавних екосистем, що сприятиме природному регулюванню водного режиму та зменшенню ризиків вторинного підтоплення.

Аналіз NDVI дозволяє уточнити доцільність господарського використання конкретних земельних ділянок. Зони зі стійко низькими значеннями NDVI можуть свідчити про деградований стан рослинного покриву або невідповідність поточного виду землекористування новим природним умовам.

У таких випадках результати дослідження можуть слугувати аргументом для тимчасової консервації земель або їх екологічної реабілітації.

На основі проведеного дослідження доцільно сформулювати такі рекомендації:

- Використовувати результати аналізу NDWI при оновленні матеріалів землеустрою з метою ідентифікації ділянок зі зміненним або нестабільним водним режимом та коригування їх функціонального призначення.

- Застосовувати поєднання індексів NDVI та NDWI для обґрунтування змін у структурі землекористування, зокрема при переході від інтенсивного землеробства до екологічно орієнтованих форм використання земель.

- Рекомендувати створення буферних та природоохоронних зон на територіях із підвищеним зволоженням або нестабільною динамікою водної поверхні, що сприятиме зменшенню антропогенного навантаження та відновленню природних екосистем.

- Використовувати розроблену методику як інструмент регулярного моніторингу, що дозволяє оперативно відстежувати подальші зміни стану територій у післякатастрофний період без значних фінансових витрат.

Таким чином, результати даного дослідження можуть бути використані не лише для наукового аналізу, а й як практичний інструмент підтримки прийняття рішень у сфері землеустрою та управління земельними ресурсами в умовах післякатастрофних трансформацій.

## Висновки та пропозиції

Сучасний етап розвитку земельних і водних ресурсів Півдня України характеризується глибокими трансформаціями, зумовленими як довготривалими природно-кліматичними процесами, так і різкими антропогенними впливами. Підрив Каховської гідроелектростанції став подією, що кардинально змінила гідрологічний режим значних територій та поставила перед фахівцями у сфері землеустрою, екології та управління природними ресурсами нові виклики. У таких умовах особливої актуальності набуває використання сучасних методів дистанційного зондування Землі, які дозволяють оперативно, об'єктивно та просторово повно оцінювати зміни стану територій.

Проведене у межах магістерської роботи дослідження підтверджує, що супутникові дані Sentinel-2 у поєднанні зі спектральними індексами NDVI та NDWI є ефективним інструментом моніторингу змін водної поверхні та рослинного покриву на локальному рівні. Використання багаточасових знімків за 2021–2025 роки дозволило простежити динаміку стану території до катастрофи, у післяаварійний період та на етапі подальших трансформацій, що є принципово важливим для коректної інтерпретації змін.

У ході дослідження встановлено, що зміни водного режиму безпосередньо відображаються на просторовій структурі рослинного покриву. Аналіз індексу NDWI засвідчив істотну трансформацію площ відкритої води та зволених ділянок, а також формування нестабільних перехідних зон між сушею і водними поверхнями. Водночас індекс NDVI відобразив реакцію рослинності на зміну умов зволоження — від деградації окремих ділянок до процесів часткової адаптації та переформування рослинних угруповань. Поєднання цих індексів дозволило розглядати територію як цілісну природно-антропогенну систему, а не як сукупність ізольованих компонентів.

Важливою особливістю роботи є зосередження на відносно невеликій за площею території — локальному полігоні в районі с. Новоберислав. Такий підхід дозволив детально проаналізувати просторові відмінності та уникнути узагальнень, характерних для досліджень великих територій. Результати підтверджують, що саме локальний масштаб є найбільш доцільним для вирішення практичних завдань землеустрою, оцінки стану земель і планування їх подальшого використання.

Отримані в роботі результати свідчать про те, що наслідки підриву Каховської ГЕС не слід розглядати виключно як негативне явище. Виявлені просторові закономірності можуть бути використані як інформаційна основа

для переосмислення підходів до землекористування та формування більш адаптивної моделі управління територіями. Зокрема, дані супутникового моніторингу дають змогу ідентифікувати ділянки, які втратили придатність для інтенсивного сільськогосподарського використання, а також території, перспективні для формування буферних зон, природоохоронних об'єктів або екологічної реабілітації.

У практичному аспекті результати дослідження можуть бути використані при актуалізації матеріалів землеустрою, розробленні схем просторового планування та прийнятті управлінських рішень щодо раціонального використання земель. Регулярне застосування індексів NDVI та NDWI дозволяє здійснювати моніторинг змін без значних фінансових витрат і з високою просторовою деталізацією, що є особливо важливим у післякатастрофний період, коли наземні обстеження є ускладненими.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розширення часових рядів супутникових спостережень, залучення додаткових спектральних показників і поєднання дистанційного зондування з іншими джерелами просторових даних. Це дозволить більш глибоко оцінити довготривалі наслідки зміни гідрологічного режиму та сформувані науково обґрунтовані сценарії відновлення й розвитку територій Півдня України.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що використання сучасних супутникових технологій у поєднанні з геоінформаційними методами створює потужний інструментарій для аналізу та управління земельними ресурсами в умовах кризових трансформацій. Отримані в магістерській роботі результати підтверджують доцільність впровадження дистанційного моніторингу як складової системи сталого землекористування та можуть слугувати основою для подальших наукових і прикладних досліджень у сфері геодезії та землеустрою.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ :**

1. Copernicus SentiWiki. Sentinel-2 Mission [Электронный ресурс]. – <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>
2. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. та ін. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 120. – P. 25–36.
3. European Space Agency. Copernicus Programme Overview [Электронный ресурс]. – [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus)
4. European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook. – ESA Standard Document, 2015.
5. European Space Agency. Sentinel-2 MSI – Spectral Response Functions
6. Phiri D., Simwanda M., Salekin S. та ін. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, No. 14. – 2291.
7. Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, No. 3. – 166.
8. Malenovský Z., Rott H., Cihlar J. та ін. Sentinel-2 for science: Potential of Sentinel-2 for vegetation monitoring // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 120. – P. 77–89.
9. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. – NASA Spec. Publ. 351. – 1974. – P. 309–317.
10. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. – 1979. – Vol. 8, No. 2. – P. 127–150.
11. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Int. J. Remote Sensing. – 1996. – Vol. 17, No. 7. – P. 1425–1432.
12. Gao B.-C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58, No. 3. – P. 257–266.
13. Xu H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Int. J. Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27, No. 14. – P. 3025–3033.
14. Pettorelli N. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). – Oxford : Oxford University Press, 2013.
15. Zhang X., Friedl M. A., Schaaf C. B. Monitoring vegetation phenology using MODIS // Remote Sensing of Environment. – 2003. – Vol. 84, No. 3. – P. 471–475.
16. Wulder M. A., White J. C., Loveland T. R. та ін. Satellite-based time series analysis of land cover change // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 205. – P. 55–68.

17. Amani M., Ghorbanian A., Ahmadi S. A. та ін. Google Earth Engine cloud computing platform for remote sensing big data applications // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, No. 14. – P. 2265.
18. Blaschke T., Hay G. J., Kelly M. та ін. Object-based image analysis for remote sensing // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 87. – P. 180–191.
19. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. – 2016. – Vol. 540. – P. 418–422.
20. Кухтар Д. В. Аналіз радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1 за допомогою вебресурсу EO Browser // *Український журнал прикладної економіки та техніки*. – 2023. – Т. 8, № 4. – С. 258–263.
21. European Environment Agency. Copernicus Land Monitoring Service [Електронний ресурс]. – <https://land.copernicus.eu>
22. European Commission, Joint Research Centre. Global Surface Water Explorer [Електронний ресурс]. – <https://global-surface-water.appspot.com>
23. United Nations Environment Programme. Remote sensing for environmental monitoring
24. Copernicus Emergency Management Service. Rapid Mapping and Risk & Recovery Mapping [Електронний ресурс]. – <https://emergency.copernicus.eu>
25. European Commission, Emergency Response Coordination Centre. Kakhovka Dam breach: satellite-based damage and flood assessment. – Copernicus Emergency Management Service, 2023.
26. Bade B., Schulthess U., Blasch G. та ін. Temporal Sentinel-2 imagery for wheat mapping and monitoring // *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2025. – Vol. X-G-2025. – P. 143–149.
27. Vuolo F., Neuwirth M., Immitzer M., Atzberger C. How much does Sentinel-2 improve the discrimination of agricultural crops? // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10, No. 5. – P. 808.
28. Forkuor G., Dimobe K., Serme I., Tondoh J. E. Landsat-8 vs Sentinel-2: assessing vegetation dynamics in West Africa // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2018. – Vol. 10. – P. 26–35.
29. Atefi M. R., Miura H. Detection of flash flood inundated areas using relative difference in NDVI from Sentinel-2 images // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, No. 15. – P. 3647.
30. Li J., Roy D. P. A global analysis of NDVI response to extreme hydrological events // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Vol. 195. – P. 188–201.
31. Zhang Y., Zhang H., Lin H. Remote sensing monitoring of vegetation recovery after dam construction // *Ecological Indicators*. – 2021. – Vol. 125. – P. 107540.

32. UNOSAT. Satellite-based assessment of environmental impacts after major dam failures. – United Nations, 2023.
33. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index (MNDWI) // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, No. 4. – 354.
34. Pickens A. H., Hansen M. C., Stehman S. V. та ін. Global monitoring of surface water dynamics from 1984 to present // *Nature*. – 2020. – Vol. 540. – P. 418–422.
35. World Bank. Ukraine: Rapid Damage and Needs Assessment. – Washington, DC, 2023.
36. Copernicus Land Monitoring Service. Surface Water and Wetness Monitoring. – European Environment Agency, 2023.
37. Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 75, No. 11. – P. 1307–1317.
38. Verbesselt J., Zeileis A., Herold M. Near real-time disturbance detection using satellite image time series // *Remote Sensing of Environment*. – 2010. – Vol. 114. – P. 2240–2251.
39. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. *Geographic Information Science and Systems*. – Chichester: Wiley, 2015.
40. Smentek A., Kaczmarek A., Eksert P., Blachowski J. Monitoring surface water dynamics in mining areas using remote sensing indices // *Water*. – 2025. – Vol. 17, No. 3. – 412.
41. European Commission, Joint Research Centre. Satellite-based assessment of the Kakhovka dam breach impacts. – Copernicus Emergency Management Service, 2023.
42. Vörösmarty C. J., McIntyre P. B., Gessner M. O. та ін. Anthropogenic alteration of river systems and implications for water security // *Science*. – 2010. – Vol. 327, No. 5972. – P. 148–152.
43. Ukrhydroenergo. Environmental consequences of the Kakhovka HPP destruction. – Official report, 2023.
44. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. – Open Source Geospatial Foundation Project.
45. European Space Agency. Sentinel-2 Level-2A Product Definition. – Copernicus Sentinel-2 Technical Guides.

**ДОДАТКИ:**

Просторовий розподіл значень індексу NDVI у 2021 році  
(район с. Новоберислав)



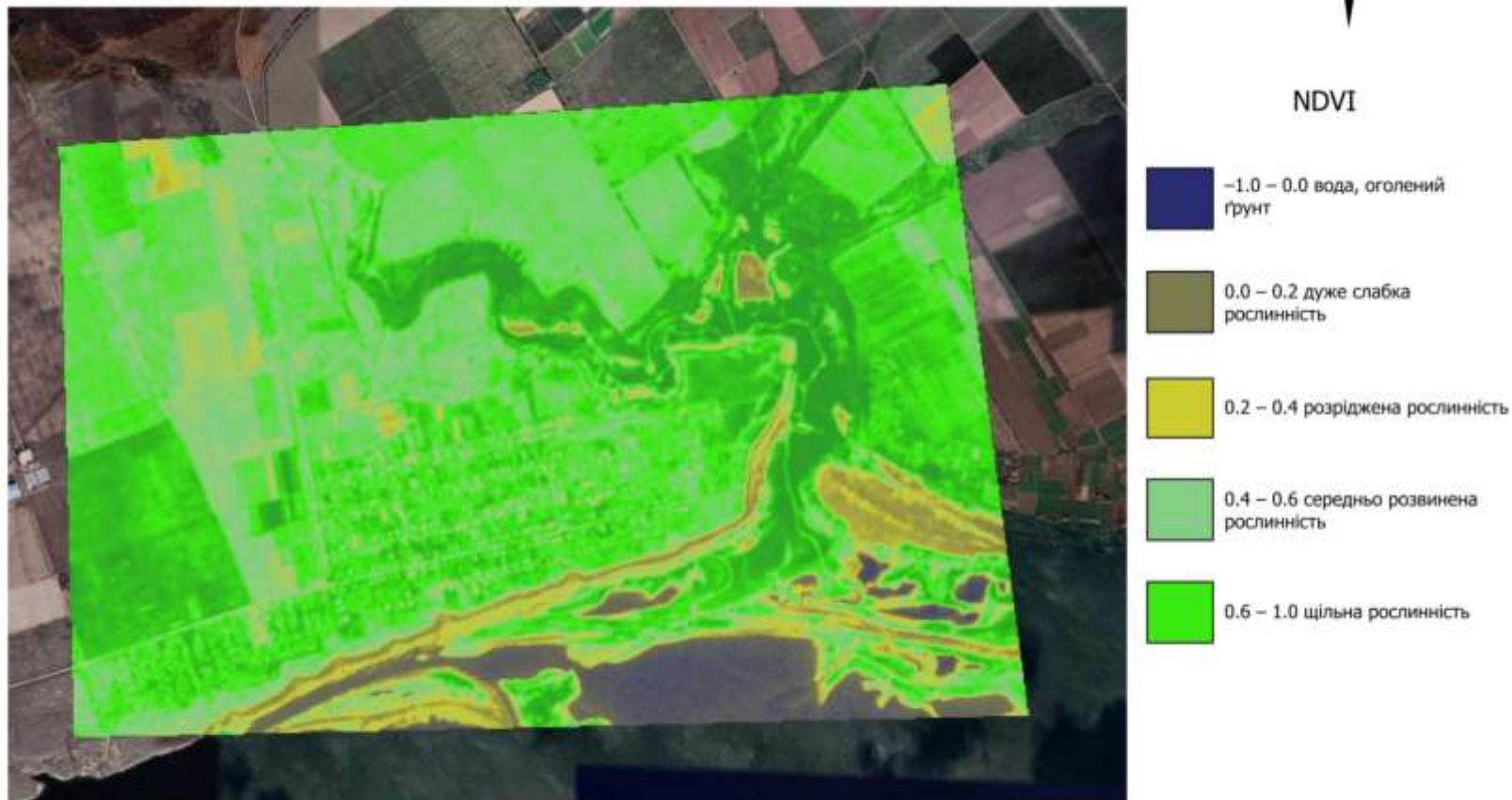
NDVI



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Додаток 1 — Просторовий розподіл індексу NDVI на досліджуваній території, 2021 р.

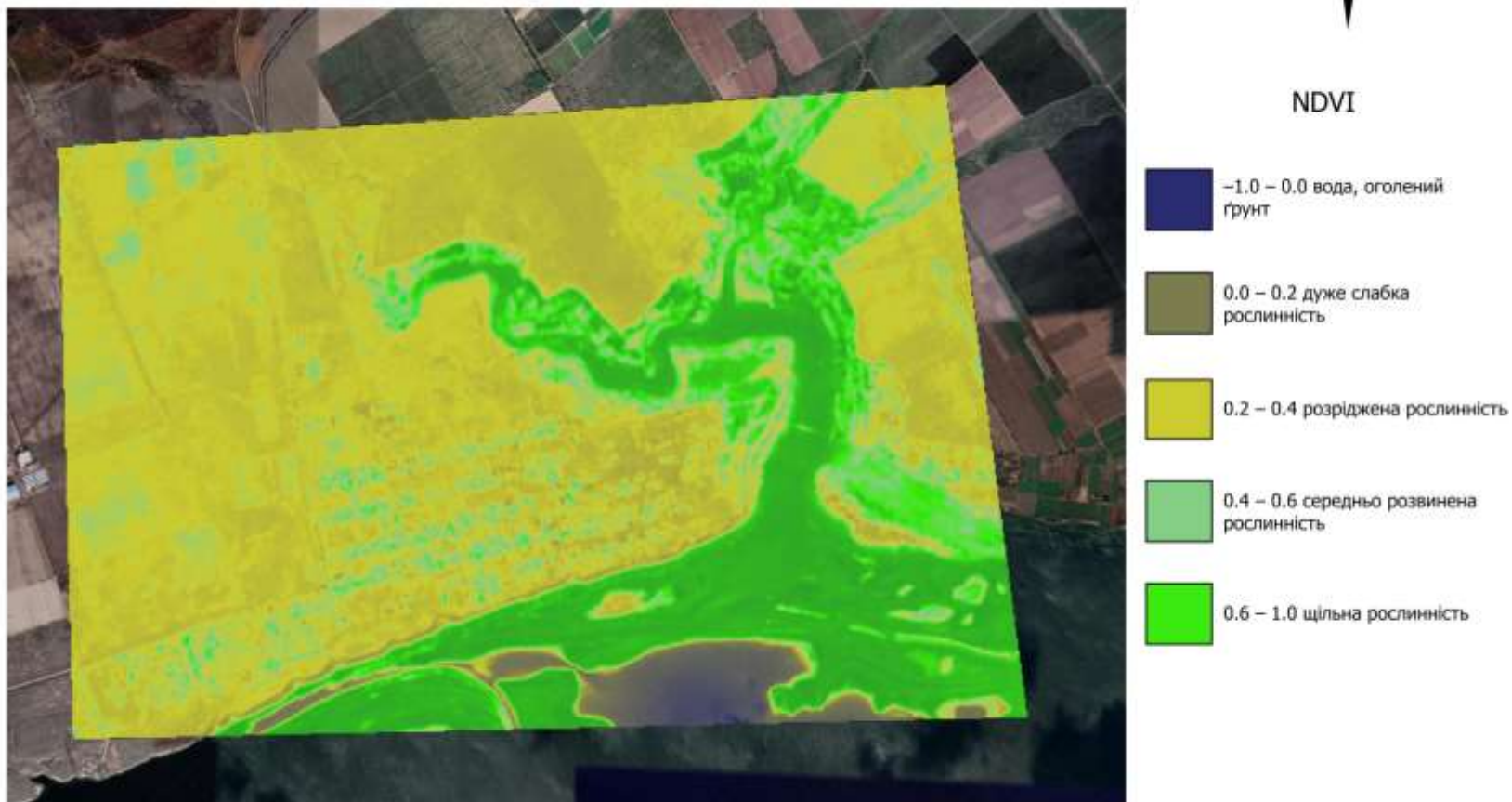
Просторовий розподіл значень індексу NDVI у 2023 році  
(район с. Новоберислав)



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Додаток 2 — Просторовий розподіл індексу NDVI на досліджуваній території, 2023 р.

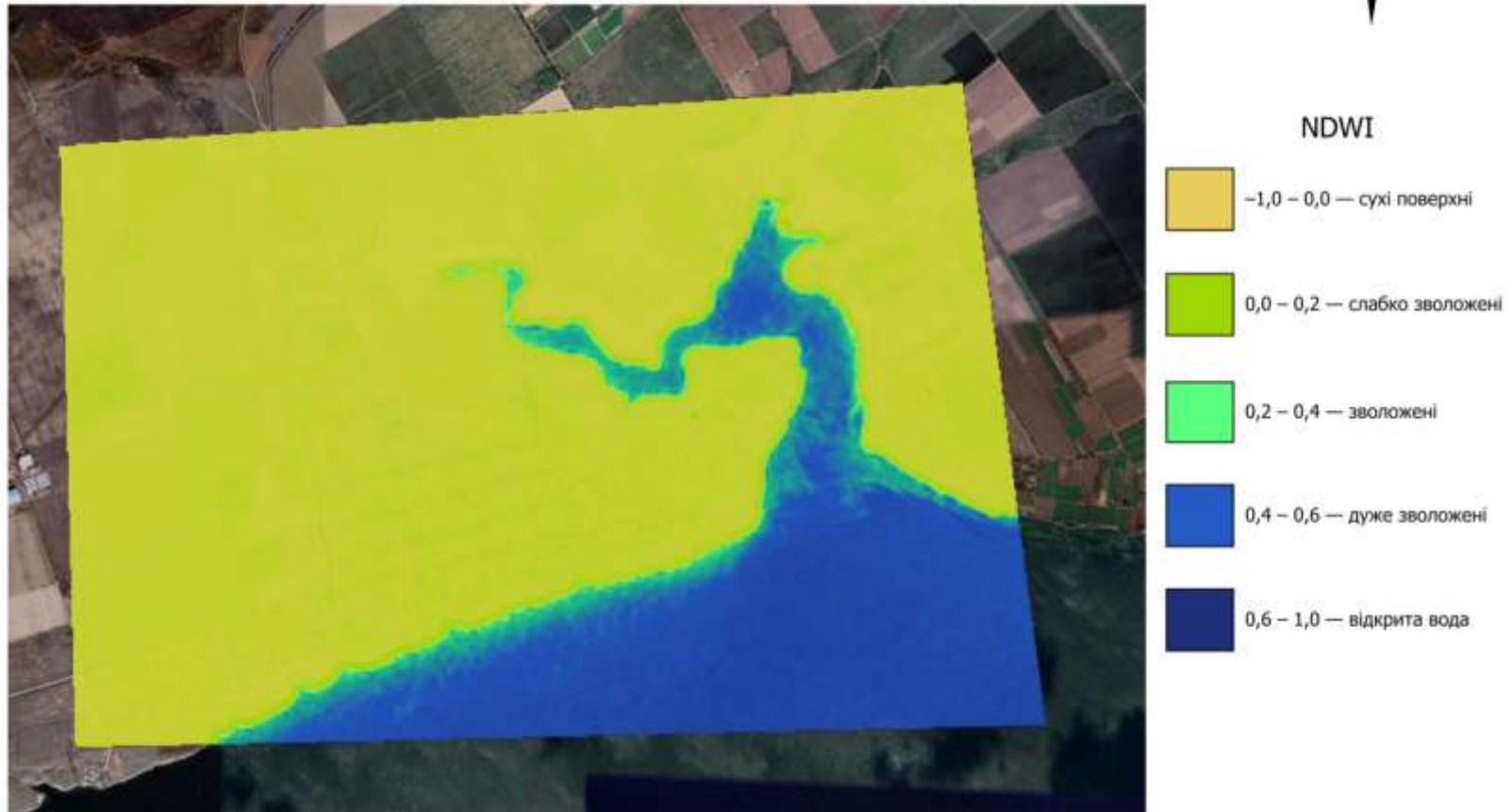
Просторовий розподіл значень індексу NDVI у 2025 році  
(район с. Новоберислав)



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Додаток 3 — Просторовий розподіл індексу NDVI на досліджуваній території, 2025 р.

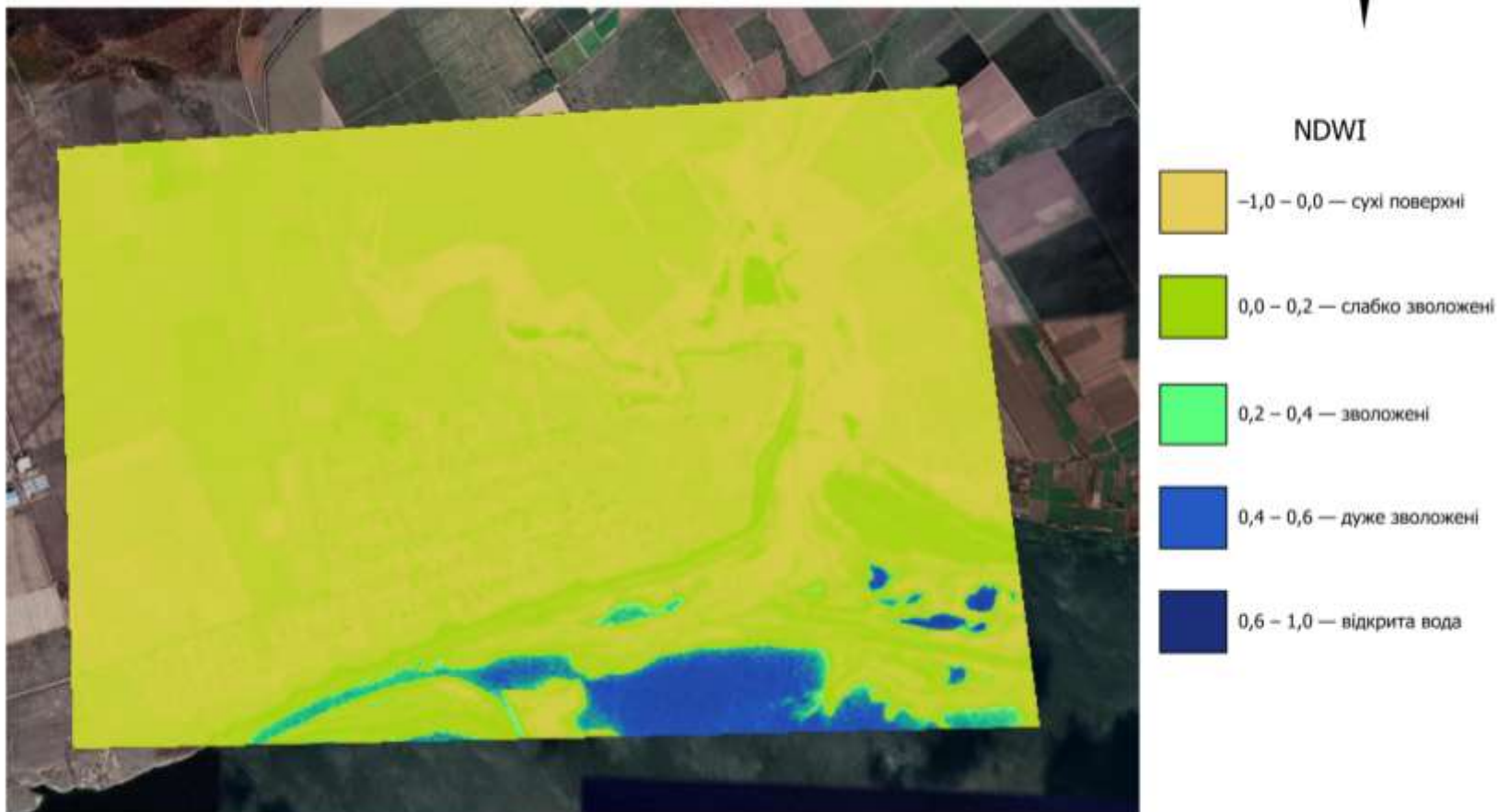
Просторовий розподіл значень індексу NDWI у 2021 році  
(район с. Новоберислав)



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Додаток 4 — Просторовий розподіл індексу NDWI на досліджуваній території, 2021 р.

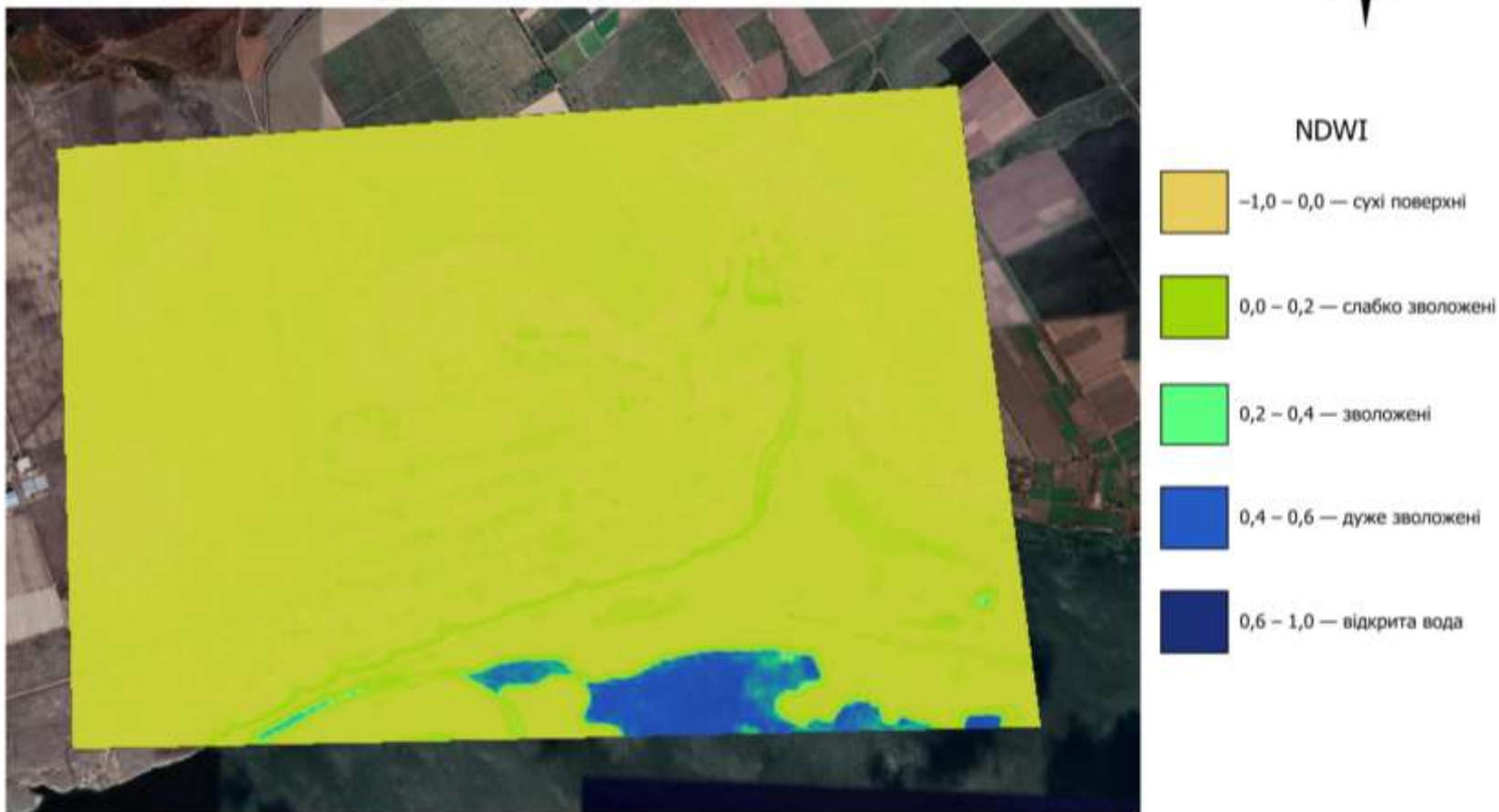
Просторовий розподіл значень індексу NDWI у 2023 році  
(район с. Новоберислав)



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Додаток 5 — Просторовий розподіл індексу NDWI на досліджуваній території, 2023 р.

Просторовий розподіл значень індексу NDWI у 2025 році  
(район с. Новоберислав)



Складено автором на основі даних Sentinel-2 L2A у середовищі QGIS 3.32

Додаток 6 — Просторовий розподіл індексу NDWI на досліджуваній території, 2025 р.

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістреської роботи «Моніторинг змін водної поверхні та рослинного покриву в районі с. Новоберислав за супутниковими індексами NDVI та NDWI Sentinel-2 (2021–2025 рр.)».

Обсяг пояснювальної записки 66 аркушів.

Перелік графічних додатків:

1. Просторовий розподіл індексу NDVI на досліджуваній території, 2021 р.
1. Просторовий розподіл індексу NDVI на досліджуваній території, 2023 р.
2. Просторовий розподіл індексу NDVI на досліджуваній території, 2025 р.
3. Просторовий розподіл індексу NDWI на досліджуваній території, 2021 р.
4. Просторовий розподіл індексу NDWI на досліджуваній території, 2023 р.
5. Просторовий розподіл індексу NDWI на досліджуваній території, 2025 р.

---

*(дата)*

---

*(підпис студента)*