

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем та управління територіями
Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕННЯ МАГІСТРА**

на тему:

Розроблення геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь каскаду
водосховищ Дніпра методами ДЗЗ

Кияшко Олександр Іванович

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних технологій та управління територіями
Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедр

_____ проф., д.т.н. **Юрій КАРПІНСЬКИЙ**

«___» _____ 2024 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕННЯ МАГІСТРА**

Розроблення геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь каскаду
водосховищ Дніпра методами ДЗЗ

Виконв студент групи ГСТм-23
193 «Геодезія та землеустрій»
Геоінформаційні системи і технології
Кияшко Олександр Іванович
Керівник Кінь Д.О.
доцент, кандидат технічних наук
Ідентичність підтверджую

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

_____доцент., к.т.н. Олена НЕСТЕРЕНКО.

«__» _____ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Кияшко Олександр Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розроблення геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь каскаду водосховищ Дніпра методами ДЗЗ

затверджена наказом ректора КНУБА № _____ від «__» _____ 2024 року

2. Керівник роботи _____доцент, к.т.н. Кінь Данило Олексійович_____

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту: _____

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Вступ

Розділ 1. Аналіз використання даних та методів ДДЗ для моніторингу водно-болотних угідь

Розділ 2. Розроблення системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь дніпровських водосховищ

Розділ 3. Геоморфологічний аналіз та формування меж ВБУ Дніпровських водосховищ на основі ЦРМ

Розділ 4. Дослідна реалізація геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь

Висновки

Список використаної літератури

5. Графічні матеріали:

Тематична карта динаміки змін водно-болотних угідь у верхів'ї Київського водосховища; тематична карта динаміки змін водно-болотних угідь у верхній та середній частинах Канівського водосховища; тематична карта динаміки змін водно-болотних угідь у верхів'ї Кременчуцького водосховища; результат обчислення просторового індексу в програмному забезпеченні QGIS; графік, що відображає динаміку індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) протягом п'яти років на території водно-болотних угідь Цибульської затоки та нижньої частини Кременчуцького водосховища; графік, що відображає динаміку індексу NDVI протягом п'яти років на території водно-болотних угідь Сульської затоки Кременчуцького водосховища; графік, що відображає динаміку індексу NDVI протягом п'яти років на території водно-болотних угідь верхів'я Кам'янського водосховища.

6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту
Розділ 1. Аналіз використання даних та методів ДДЗ для моніторингу водно-болотних угідь. Аналіз предметної сфери та останніх публікацій щодо застосування ГІС та ДЗЗ для моніторингу водно-болотних угідь. Історія формування каскаду Дніпровських водосховищ. Водно-болотні угіддя та їх екологічне значення для навколишнього середовища. Розвиток сучасних супутникових систем для здійснення моніторингу земного покриву . Характеристики та порівняння знімальної апаратури супутників Landsat та Sentinel. Програма Landsat: Можливості знімальної апаратури. Програма Sentinel: Можливості знімальної апаратури.	03.10.2024
Розділ 2. Розроблення системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь дніпровських водосховищ. Розроблення методики дослідження змін водноно-болотних угідь за допомогою ГІС та ДЗЗ. Розроблення функціональної моделі системи геоінформаційного моніторингу водноно-болотних угідь.	28.10.2024

<p>Опис вихідних даних дослідженн Розділ 3. Геоморфологічний аналіз та формування меж ВБУ Дніпровських водосховищ на основі ЦРМ Розроблення методики формування меж ВБУ на прикладі Київського водосховища Формування меж інших ВБУ дніпровських водосховищ</p>	
<p>Розділ 4. Дослідна реалізація геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь. Отримання даних дистанційного зондування Землі . Попереднє опрацювання космічних знімків та методи їх покращення. Застосування інструменту Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Керована класифікація супутникових знімків . Оцінка стану та динаміки змін ВБУ. Оцінка динаміки змін ВБУ зміни водно-болотних угідь ділянки верхів'я Київського водосховища. Оцінка динаміки змін ВБУ верхньої та середньої ділянки Канівського водосховища. Оцінка динаміки змін ВБУ верхів'я Кременчуцького водосховища. Моніторинг стану евтрофікації водойм за вегетаційними індексами. Висновки</p>	18.11.2024
Складання резюме та остаточне оформлення роботи	30.11.2024
Подання роботи на перевірку на плагіат	25.11.2024
Подання роботи на рецензування	10.12.2024
Попередній захист роботи на кафедрі	06.12.2024

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
1	Лазоренко Н.Ю. доцент, кандидат технічних наук		
2	Лазоренко Н.Ю. доцент, кандидат технічних наук		

8. Дата видачі завдання _____

Зав. кафедри _____ Юрій КАРПІНСЬКИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Данило КІНЬ

(підпис) (прізвище та ініціали)
 Студент _____ Олександр КИЯШКО.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕЗЮМЕ (summary)		Кияшко Олександр Іванович	
<i>до атестаційної випускної роботи студента:</i>			
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i>	Розроблення геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь каскаду водосховищ Дніпра методами ДЗЗ		
<i>Освітній ступень</i>	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедра</i>	Геоінформатики і фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	193 Геодезія і землеустрій		
<i>Спеціалізація</i>	Геоінформаційні системи та технології		
<i>Керівник</i>	Кінь Данило Олексійович, к. т. н., доцент		
<i>Обсяг роботи:</i>	<i>пояснювальна записка, стор.</i>	<i>розділів</i>	<i>графічних матеріалів</i>
	111	4	43
<i>Розділ 1</i>	Розглянуто нормативно-методичну базу та сучасний стан водно-болотних угідь (ВБУ) Дніпровських водосховищ. Проведено аналіз останніх публікацій, присвячених застосуванню геоінформаційних систем (ГІС) та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу ВБУ. Висвітлено історію формування каскаду Дніпровських водосховищ, їх екологічне значення, а також ключові екологічні виклики. Досліджено розвиток сучасних супутникових систем, зокрема Landsat та Sentinel, які є основними джерелами даних для моніторингу.		
<i>Розділ 2</i>	Розроблено методику моніторингу ВБУ із застосуванням ГІС та ДЗЗ, яка включає збір, обробку, аналіз і візуалізацію супутникових даних. Складено функціональну модель системи геоінформаційного моніторингу, яка дозволяє автоматизувати процеси аналізу стану ВБУ та визначення змін у просторі та часі. Особливу увагу приділено опису вихідних даних, які включають супутникові знімки Landsat і Sentinel, цифрову модель рельєфу, шейп-файли меж ВБУ та вегетаційні індекси (NDVI).		
<i>Розділ 3</i>	Реалізовано практичну частину моніторингу, включаючи отримання даних ДЗЗ, їх попередню обробку, класифікацію та обчислення вегетаційних індексів. Визначено динаміку змін ВБУ для окремих ділянок Київського, Канівського та Кременчуцького водосховищ. Проведено оцінку стану евтрофікації водойм за допомогою індексу NDVI та створено тематичні карти змін екосистем.		
<i>Розділ 4</i>	Реалізовано практичну частину моніторингу, включаючи отримання даних ДЗЗ, їх попередню обробку, класифікацію та обчислення вегетаційних індексів. Визначено динаміку змін ВБУ для окремих ділянок Київського, Канівського та Кременчуцького водосховищ. Проведено оцінку стану евтрофікації водойм за допомогою індексу NDVI та створено тематичні карти змін екосистем.		
<i>Висновки по роботі:</i>	У роботі створено систему геоінформаційного моніторингу ВБУ Дніпровських водосховищ, яка дозволяє ефективно відстежувати екологічний стан угідь і динаміку їхніх змін. Запропонований підхід забезпечує точність і автоматизацію обробки супутникових даних та		

	інтеграцію ГІС у моніторингові програми. Результати дослідження можуть бути використані для покращення управління ВБУ, збереження їх екосистемних послуг та зменшення негативного впливу антропогенних факторів.
--	--

Ключові слова: геоінформаційні системи; дистанційне зондування Землі; водно-болотні угіддя; Дніпровські водосховища; вегетаційний індекс NDVI; евтрофікація; цифрова модель рельєфу; класифікація супутникових знімків; моніторинг екосистем; антропогенний вплив.

Keywords: geographic information systems; remote sensing; wetlands; Dnipro reservoirs; vegetation index NDVI; eutrophication; digital elevation model; satellite image classification; ecosystem monitoring; anthropogenic impact.

Укладач : _____ / _____ /

Керівник: _____ / _____ /

« ___ » _____ 2023 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	12
Завданнями цієї роботи є:.....	13
1. Розробити методику моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ із використанням сучасних технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС).....	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ТА МЕТОДІВ ДДЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ	15
1.1 Аналіз предметної сфери та останніх публікацій щодо застосування ГІС та ДЗЗ для моніторингу водно-болотних угідь	15
1.2 Історія формування каскаду Дніпровських водосховищ	17
1.3 Водно-болотні угіддя та їх екологічне значення для навколишнього середовища	21
1.4 Розвиток сучасних супутникових систем для здійснення моніторингу земного покриття	25
1.5 Характеристики та порівняння знімальної апаратури супутників Landsat та Sentinel.....	28
1.5.1 Програма Landsat: Можливості знімальної апаратури	28
1.5.2 Програма Sentinel: Можливості знімальної апаратури	30
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩ.....	33
2.1 Розроблення методики дослідження змін водно-болотних угідь за допомогою ГІС та ДЗЗ	33
2.2 Розроблення функціональної моделі системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь	36
2.3 Опис вихідних даних дослідження.....	39
РОЗДІЛ 3. ГЕОМОРФОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ФОРМУВАННЯ МЕЖ ВБУ ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩ НА ОСНОВІ ЦМР	43
3.1 Розроблення методики формування меж ВБУ на прикладі Київського водосховища	43
3.2 Формування меж інших ВБУ дніпровських водосховищ	51

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ	53
4.1 Отримання даних дистанційного зондування Землі	53
4.2 Попереднє опрацювання космічних знімків та методи їх покращення .	54
4.3 Застосування інструменту Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)..	56
4.4 Керована класифікація супутникових знімків.....	64
4.5. Оцінка стану та динаміки змін ВБУ	69
4.5.1 Оцінка динаміки змін ВБУ зміни водно-болотних угідь ділянки верхів'я Київського водосховища	69
4.5.2 Оцінка динаміки змін ВБУ верхньої та середньої ділянки Канівського водосховища.....	73
4.5.3 Оцінка динаміки змін ВБУ верхів'я Кременчуцького водосховища	76
4.5.4. Моніторинг стану евтрофікації водойм за вегетаційними індексами	79
ВИСНОВКИ	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	96
1. ДОДАТОКИ	106

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Водно-болотні угіддя (ВБУ) або ветланди – території водойм, маршів, боліт, драговин, торфовищ – штучних і природних, постійних і тимчасових, стоячих і проточних, прісних, солонкуватих або солоних, включаючи морські акваторії, глибина яких менша шість метрів [3].

Дані дистанційного зондування Землі – це дані, які отримані за допомогою приладів чи апаратури дистанційного зондування, які встановлені на борту космічного апарату, і які передаються або доставляються з космосу на Землю у вигляді електромагнітних сигналів [**Error! Reference source not found.**].

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – це процес, що включає спостереження, фіксацію та вимірювання енергетичних і поляризаційних характеристик як власного, так і відбитого випромінювання елементів суші, океанів і атмосфери Землі. Цей процес здійснюється за допомогою реєструючих приладів, які не мають фізичного контакту з об'єктами спостереження, і охоплює різні діапазони електромагнітних хвиль [**Error! Reference source not found.**].

Еталонні ділянки (сигнатури) – це специфічні території в межах тестових аграрних полігонів, які можна легко ідентифікувати на зображеннях завдяки їх унікальним властивостям. Ці ділянки можуть бути використані для визначення інших схожих територій [1].

Спектральні діапазони – окремі інтервали електромагнітного спектру, виділені для зручності аналізу. Приклади спектральних діапазонів включають видиме світло, інфрачервоне випромінювання, рентгенівське випромінювання, та середньоінфрачервоне випромінювання [3].

Мультиспектральний космознімок – це зображення поверхні Землі, яке отримане з космосу та містить дані різних частот (каналів) електромагнітного спектра. Кожен канал в цьому зображенні фіксує випромінювання або відбиття Земної поверхні в певних діапазонах довжин

хвиль [3].

Гігрофіти – вологолюбні суходольні рослини, що зростають в умовах надмірного зволоження ґрунту та повітря [74].

Гідрофіти – рослини, що живуть у воді (прикріплені до ґрунту, занурені у воду лише нижньою частиною, цілком занурені у воду, не прикріплені до ґрунту і ті, що знаходяться на поверхні води або в її товщі) [74].

Гідатофіти – вищі, водяні рослини які, на відміну від гідрофітів, цілком або більшою своєю частиною занурені у воду; ці рослини відчують проблеми з газообміном, бо розчинність кисню у воді постійно знижується з підвищенням температури, тому для гідатофітів характерна велика поверхня органів порівняно з їх масою [75].

Біотоп – найменша просторова одиниця з однотипними умів рельєфу, клімату та інших абіотичних факторів; ділянка території, однорідна за умовами життя для певних видів рослин або тварин або для формування певного біоценозу [74].

ВСТУП

Водно-болотні угіддя є унікальними екосистемами та відіграють значну роль у збереженні як ландшафтного, так і біологічного різноманіття. Вони характеризуються своєрідним гідрологічним режимом, ґрунтовими покриттями, біологічним різноманіттям, а також унікальними екосистемними послугами, котрі призводять до виникнення цілого ряду відмінних ландшафтних особливостей [5].

Освоєння та антропогенний вплив на ВБУ є невід'ємним процесом розвитку людства. Проблема їх сталого використання та ревіталізації є недостатньо вивченою. Тривалий час ці екосистеми розглядались лише в якості родовищ цінної органічної сировини чи лісогосподарських угідь, чи навіть шкідливими природними утвореннями. Позитивні зміни в експлуатації боліт почалися наприкінці 60-х років, після більш детального вивчення та доказів негативних наслідків меліорації [6].

Технології дистанційного зондування Землі стали невід'ємним інструментом для моніторингу водно-болотних угідь. Використання супутникових знімків і спектральних даних, дало змогу оцінювати екологічний стан угідь у реальному часі та відстежувати зміни в динаміці їхнього розвитку. Такі місії Landsat та Sentinel, забезпечують високоточні дані з просторовим і спектральним розподілом, що дає можливість ідентифікувати різні типи земного покриття та водних об'єктів. Ці технології особливо важливі для дослідження каскаду Дніпровських водосховищ, які, створені в межах антропогенної діяльності, стали осередками евтрофікації та втрати природних екосистем.

Актуальність дослідження обґрунтована цінністю водно-болотних екосистем для збереження біорізноманіття, на фоні прискорення темпів їх деградації водно-болотних угідь верхів'я Київського водосховища.

У цій роботі здійснюється комплексний аналіз водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ на основі даних ДЗЗ. Дослідження спрямоване на вивчення екологічного стану угідь, визначення динаміки їхніх змін та оцінку впливу антропогенних факторів за допомогою методів керованої класифікації космознімків та обрахунку спектральних індексів. Проведений аналіз сприятиме розробці рекомендацій для покращення моніторингу та охорони водно-болотних угідь у контексті сучасних екологічних викликів.

Метою роботи є дослідження сучасного стану водно-болотних угідь верхів'я Київського водосховища та динаміки їх трансформації в просторі та часі.

Об'єкт дослідження – водно-болотні угіддя верхів'я Київського водосховища.

Предмет дослідження – екологічний стан водно-болотні угіддя верхів'я Київського водосховища.

Завданнями цієї роботи є:

1. Розробити методику моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ із використанням сучасних технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС).
2. Провести аналіз доступних джерел даних, зокрема супутникових знімків Sentinel-2 та Landsat, для моніторингу стану водно-болотних угідь.
3. Розробити функціональну модель системи геоінформаційного моніторингу, яка включає модулі збору, обробки, аналізу даних та візуалізації результатів.
4. Виконати оцінку динаміки змін водно-болотних угідь на прикладі Київського, Канівського та Кременчуцького водосховищ.
5. Проаналізувати антропогенні та природні фактори, що впливають на екологічний стан угідь.
6. Побудувати тематичні карти та графіки, що ілюструють зміни площ угідь та масштаби евтрофікації водойм.

Вихідними даними для роботи :

1. Супутникові знімки:

Sentinel-2 (13 спектральних каналів з просторовою роздільністю 10–60 м).

Landsat 5, 7, 8, 9 (7–11 спектральних каналів із просторовою роздільністю 30 м).

2. Цифрова модель рельєфу (ЦМР):

Данні з місії SRTM із просторовою роздільною здатністю 30 м.

3. Допоміжні геопросторові дані:

Шейп-файли меж водно-болотних угідь.

Карти глибин водойм для уточнення меж угідь.

4. Розрахункові дані:

Вегетаційні індекси NDVI та NDWI, що відображають рівень біомаси та вологості.

Дані керованої класифікації супутникових знімків для визначення типів земного покриву.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ТА МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ

1.1 Аналіз предметної сфери та останніх публікацій щодо застосування ГІС та ДЗЗ для моніторингу водно-болотних угідь

Моніторинг водно-болотних угідь (ВБУ) є одним з основних завдань для збереження природних екосистем, після чого території мають важливу екологічну роль, зокрема в регулюванні водного балансу, підтримці біорізноманіття та впливу на кліматичні зміни. Сучасні дослідження наголошують на застосуванні новітніх технологій, таких як дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційні системи (ГІС), щоб уникнути детального аналізу змін у ВБУ, прогнозувати їхній стан та оцінювати вплив антропогенних чинників.

Одним із ключових документів, що стосуються дослідження водно-болотних угідь, є Рамсарська конвенція, яка встановлює міжнародні стандарти та критерії захисту ВБУ [7]. Ця конвенція була підписана в 1971 році і стала основою глобального співробітництва в галузі економії та раціонального використання ВБУ. Її впровадження в різних країнах стимулювало наукові дослідження та впровадження нових технологій для моніторингу та оцінки стану цих

Однією з основних технологій, що застосовуються для моніторингу ВБУ, є дистанційне зондування Землі. Використання супутникових знімків дозволяє не тільки перевірити оцінку стану угідь, але й проаналізувати їхню динаміку в часі. також, мультиспектральні та радарні знімки допомагають визначати рівень вологості, стан рослинності та оцінювати масштаби евтрофікації. Сучасні супутникові платформи, такі як Sentinel та Landsat, дозволяють отримати зображення з високою просторовою та спектральною роздільною здатністю, що є ключовим для точного аналізу стану ВБУ [8].

Наукові дослідження також активно використовують методи класифікації зображення для автоматичного виділення ВБУ на супутникових знімках. Застосування алгоритмів керованої класифікації, таких як метод максимальної ймовірності (Maximum Likelihood) та метод опорних векторів (Support Vector Machine), забезпечує точність розпізнавання водно-болотних територій на основі спектральних характеристик зображення [9]. Також важливу роль відіграють вегетаційні індекси, такі як NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) і NDWI (Normalized Difference Water Index), які створюють для оцінки стану рослинного покриву та рівня вологості ВБУ [10].

Крім дистанційного зондування, для моніторингу ВБУ активно використовують ГІС-технології. Вони не можуть інтегрувати та аналізувати дані з різних джерел, що дає можливість створювати комплексні моделі динаміки змін угідь у просторі та часі. Дослідження на основі ГІС допомагають виявити тенденції зміни площі ВБУ під впливом кліматичних змін і антропогенних факторів, що є місцем для розробки стратегії їхнього охорону [11].

Серед сучасних наукових праць можна виділити дослідження впливу кліматичних змін на водно-болотне угіддя. Наприклад, роботи, присвячені аналізу підвищення рівня Світового океану та його впливу на прибережні ВБУ, підкреслюють необхідний комплексний підхід до моніторингу, який включає як дані ДЗЗ, так і зовнішні спостереження [12]. Інші дослідження зосереджуються на вивченні впливу сільського господарства та урбанізації на стан ВБУ, що є особливо актуальним для Дніпровських водосховищ, де інтенсивне використання територій навколо водних об'єктів призводить до деградації природних екосистем [13].

Вагомий внесок у вдосконалення методів аналізу та тематичної інтерпретації космічних знімків зробили науковці, зокрема Бутенко О. С., Березіна С. І., та Красовський Г. Я. [63;64;65] та інші. Було видано численні наукові монографії, присвячені можливостям використання технологій ГІС та ДЗЗ для моніторингу стану водних об'єктів. Значний вклад у цій сфері

зробили такі автори, як Красовський Г. Я., Анпілова Є. С., Довгий С. О. та Радчук В. В. [66, 63,65]. Дослідженням змін, що відбуваються більшою мірою у водних екосистемах, за допомогою методів ДЗЗ присвячені публікації Томченко О. В. [71;70;69;68], Загородні С. А. [72], Стародубцева В. М. [67], Толстохатка В. А. [73] та інших.

Таким чином, використання ДЗЗ та ГІС у моніторингу водно-болотних угідь дозволяє ефективно оцінювати стан цих екосистем та передбачати їхні зміни під впливом антропогенних і природних факторів. Сучасні дослідження активно розвивають ці методи, що робить їх незамінними для планування заходів з охорони ВБУ.

1.2 Історія формування каскаду Дніпровських водосховищ

Передумови та будівництво. Ідея створення греблі на Дніпрі виникла ще за часів правління Катерини II. Через Дніпровські пороги річка була складною для судноплавства, що й стало основним стимулом для розробки проектів зі створення штучних споруд для регулювання водного потоку. У 1778 році вперше було здійснено спробу зруйнувати пороги, але вона виявилась невдалою. Проте це стало основою для подальших інженерних розробок. Лише у 1905 році інженери Максимов і Графтію запропонували проект гідроелектростанції, який пізніше перетворився на концепцію будівництва *ДніпроГЕС*, що призвело до створення Дніпровського водосховища. Реалізації цього плану завадила Перша світова війна[46].

На початку ХХ століття ситуація кардинально змінилася. Після численних воєнних та економічних потрясінь, Запоріжжя стало ключовим центром електрифікації країни. У 1920-х роках інженер Іван Александров представив проект найбільшої гідроелектростанції в Європі, який було втілено у 1932 році з запуском першого гідроагрегату ДніпроГЕС. Це будівництво стало потужним імпульсом для розвитку промислового

потенціалу міста і мало вирішальне значення для електрифікації всього регіону [46].

ДніпроГЕС зіткнувся з численними труднощами, серед яких були дефіцит техніки та необхідність виконання великої частини робіт вручну. Ці виклики були подолані завдяки допомозі іноземних фахівців, таких як американський інженер Х'ю Купер, який запропонував використовувати бетон замість каменю для будівництва греблі, що значно полегшило процес. Під час Другої світової війни станція зазнала значних пошкоджень, але відновлення почалося вже в 1944 році та завершилося в 1950 році [46].

Наступним масштабним проектом було будівництво *Каховської ГЕС*, (призвело до створення Каховського водосховища), що почалося у вересні 1950 року за рішенням уряду СРСР. Мета полягала в забезпеченні південних районів України і півночі Криму водою для зрошення, а також електроенергією. Каховська ГЕС зводилася на місці історичного Великого Лугу, території, важливої для історії Запорізької Січі, яка була затоплена під час наповнення водосховища [47].

Будівництво гідроелектростанції доручили управлінню «Дніпробуд», яке раніше займалося Дніпровською ГЕС. На будівництві працювало близько 12 тисяч робітників, а також використовувалась значна кількість техніки, включаючи 1100 автомобілів, 75 кранів і 100 бульдозерів. Закладка першого кубометру бетону відбулася в 1952 році, а монтаж першої турбіни завершили в жовтні 1955 року. Цей момент вважається датою народження ГЕС, а вже у 1956 році запрацював останній шостий гідроагрегат. Загальна потужність станції досягла 312 МВт, і 1959 року її офіційно ввели в промислову експлуатацію [47].

Будівництво Кременчуцької ГЕС (1954–1960р.) стало наступним етапом та одним з ключових елементів каскаду гідроелектростанцій на Дніпрі. Основною метою її спорудження було вирішення проблеми нестабільного водопостачання ДніпроГЕС, яка через нерівномірний стік Дніпра часто працювала зі значними перебоями. Вже восени 1959 року перші агрегати

ГЕС почали виробляти електроенергію, а в 1960 році станція вийшла на повну потужність, забезпечуючи електрику для Києва, Харкова та інших промислових центрів [48].

Формування Кременчуцького водосховища стало значною подією не тільки з інженерної, але й з соціально-екологічної точки зору. Для його створення було затоплено понад 186 населених пунктів у трьох областях — Черкаській, Полтавській та Кіровоградській. Це призвело до переселення понад 150 тисяч осіб та знищення значних площ родючих земель, лісів і численних історичних пам'яток. Водосховище, стало найбільшим в Україні за площею і об'ємом, було створене для регулювання стоку Дніпра та підтримання роботи не лише Кременчуцької ГЕС, а й інших станцій каскаду [48].

Київське водосховище було створене у 1965 році в межах реалізації проєкту Київської ГЕС, розташованої поблизу м. Вишгород, Київської області. Основні конструкції гідровузла включають греблю, лівобережну дамбу довжиною 42,3 км, водоскидну греблю з пропускною здатністю 8140 м³/с та однокамерний судноплавний шлюз. ГЕС обладнана 20-ма капсульними агрегатами з сумарною потужністю 433 МВт. Повний об'єм водосховища становить 3,73 км³, корисний — 1,17 км³. Довжина водойми — 110 км, максимальна ширина — 12 км, середня глибина — 4 м, а максимальна — 14,5 м [50;49].

Водосховище виконує функції регулювання стоку та забезпечення потреб гідроенергетики. Воно використовується для добового та тижневого регулювання роботи Київської ГЕС і частково Канівської ГЕС, а також для підтримання подачі води в нижній б'єф у періоди маловоддя. Захисні споруди завдовжки 86 км оберігають від затоплення 57,6 тис. га земель. Площа мілководь становить 31,2 тис. га, із яких освоєно 18 тис. га [50].

За аналогією з іншими водосховищами, будівництво Київської ГЕС, окрім екологічних мало й економічно-соціальні наслідки, одним з яких можна назвати розвитку Вишгорода. З початком будівництва Київської ГЕС

Вишгород зазнав швидкого розвитку і трансформації. У січні 1968 року селище міського типу було перетворено на місто, а в 1973 році Вишгород став районним центром [49].

Будівництво *Кам'янського водосховища* розпочалося в 1951 році в рамках програми розвитку гідроелектроенергетики на Дніпрі. Основна мета, за аналогією з іншими - регулювання стоку, підвищення виробництва електроенергії та поліпшення умов для судноплавства. Проектом передбачалося зведення Кам'янської гідроелектростанції, яка стала основним компонентом гідровузла [51].

Водосховище було заповнене у 1956 році, загальна площа якого становить приблизно 170 км², а об'єм води досягає близько 2,3 км³. Максимальна глибина водосховища становить 18 м, а нормальний підпертий рівень — 67 м. Під час формування водосховища відбулося затоплення значних площ земель, включаючи населені пункти, сільськогосподарські угіддя та природні ресурси [51].

Будівництво Канівської ГЕС була заключним етапом в формуванні каскаду дніпровських водосховищ, та збудована у 1960-х роках. У 1963 році розпочалося активне будівництво самої ГЕС, яке дало імпульс розвитку міста Канева. У 1964 році на території розпочалися роботи, спрямовані на створення нової гідроелектростанції, що стала другою сходинкою Дніпровського каскаду [52].

Введення в експлуатацію першого гідроагрегата відбулося 4 листопада 1972 року. Цей об'єкт став основним бюджетоутворюючим підприємством для міста, сприяючи соціально-економічному розвитку регіону. З моменту свого запуску Канівська ГЕС виробила значну кількість електроенергії, забезпечуючи потреби Черкащини та впливаючи на енергетичну безпеку України [52].

Загалом формування каскаду Дніпровських водосховищ стало важливим етапом в історії української енергетики та інфраструктури. Кожна з ГЕС сприяла розвитку соціально-економічної інфраструктури, але водночас

викликала значні екологічні та соціальні наслідки, такі як переселення населення та затоплення сільськогосподарських угідь.

1.3 Водно-болотні угіддя та їх екологічне значення для навколишнього середовища

Водно-болотні угіддя (ВБУ) – території водойм, маршів, боліт, драговин, торфовищ – штучних і природних, постійних і тимчасових, стоячих і проточних, прісних, солонкуватих або солоних, включаючи морські акваторії, глибина яких менша 6 метрів [3].

Питання важливості вивчення, моніторингу та збереження ВБУ в усьому світі було підняте ще в 1805 р., коли вперше було обґрунтовано важливість таких екосистем та створено природний резерват «Торфовище в Гаммелмозен» в Данії [33].

У подальшому питання важливості поєднання збереження та моніторингу ВБУ було підняте в 1971 році підписанням Рамсарської конвенції, яка здебільшого зосереджується на охороні цих екосистем насамперед, як місць для природнього існування та гніздування водоплавних видів птахів. Рамсарська конвенція надає країнам-підписантам ряд інструментів та напрямків для діяльності та ефективного управління перезволоженими біотопами. Ці інструменти включають розробку та реалізацію планів управління, екологічний моніторинг (зокрема за допомогою дистанційного зондування), формування національних стратегій збереження та раціонального використання вологих зон, підтримку наукових досліджень і розвиток міжнародного співробітництва [34].

У порівнянні з іншими екосистемами ВБУ є унікальними та мають велике значення у збереженні біологічного та ландшафтного різноманіття. Вони вирізняються особливим гідрологічним режимом, ґрунтами, біорізноманіттям та унікальними екосистемними послугами [35].

Зараз ветланди охоплюють лише 3% планети [36], але в порівнянні з іншими екосистемами є дуже різноманітними. Ландшафтне різноманіття водно-болотних угідь має свої особливості і відмінності. Водно-болотні угіддя вирізняються вираженою неоднорідністю гідрологічних, геоморфологічних, ґрунтових, та інших умов і контрастним мікро – і мезокліматичним режимом цих ділянок. Такі відмінності болотних ландшафтів є більш вираженими в порівнянні із зональними відмінностями і призводять до формування різноманітних екотонів з контрастним, часто сильно фрагментованим, мозаїчним фітоценотичним покривом [37].

Гідрологія ветландів є ключовою особливістю цих екосистем. ВБУ відрізняються наявністю стоячої або проточної води, яка може бути як сезонною, так і постійною, що призводить до формування ряду ландшафтних характеристик, притаманних тільки таким територіям [35]. В залежності від ряду відповідних особливостей, визначаються п'ять основних типів ВБУ [38]:

1) морські — це території, які включають прибережні лагуни; морські акваторії, разом із островами, прибережні низини, котрі затоплюються морською водою.

2) гирлові — рукави річок та дельти, протоки та ділянками суші між ними, а також заплавні та пригирлові мілководдя;

3) озерні — різні за походженням природні озера, постійні або тимчасові, стоячі та проточні, іноді солоні, або з водою різного ступеня мінералізації;

4) річкові — ріки, струмки, в тому числі тимчасові водотоки, разом з заплавами, надзаплавними терасами чи іншими долинними комплексами;

5) болотні — перезволожені території з гідрофітною рослинністю та шаром торфу товщиною не менше 30см., включаючи верхові, перехідні та низинні (фени) болота, а також лісові, чагарникові та інші території, які розташовані поруч.

Екологічне значення цих територій значно обумовлено їх ландшафтним

різноманіття, яке в свою чергу залежить від специфічного гідрологічного режиму та формує своєрідні ґрунтові покриви. Водно-болотні ґрунти відрізняються від інших тим, що вони анаеробні - формуються без, або з мінімальним доступом кисню. В анаеробних ґрунтах, на відміну від інших, відмінний видовий склад мікроорганізмів, котрі використовують інші сполуки для підтримки своєї життєдіяльності. Серед кінцевих акцепторів електронів можна виділити нітрати, окислені форми заліза і марганцю, сульфати, а також певні органічні сполуки. Уповільнене розкладення органічних матеріалів в анаеробних умовах призводить до накопичення органічних речовин у болотному ґрунті, що робить його більш багатим у порівнянні з ґрунтами інших екосистем [39].

У світі різноманіття водно-болотних біотопів також сприяє підтримці біологічного різноманіття. Зокрема, перезволоженість, підвищений рівень ґрунтових вод або затоплення територій сприяє дефіциту кисню в корневих шарах ґрунту, що зумовлює необхідність адаптації флори до токсичних сполук, котрі виникають в анаеробних умовах. Ці умови спонукають рослини розвивати нетипові для інших видів властивості. Наприклад, деякі рослини транспортують кисень з надземних частин до кореневої системи і мають незвичайну морфологію порівняно з флорою інших екосистем. У ветландах з сезонним гідрологічним режимом рослини можуть проявляти ксероморфічні ознаки, що є морфологічною адаптацією до посушливих умов, зменшуючи рух води в ґрунтовій зоні навколо коренів і обмежуючи втрати через випаровування [40].

У межах України водно-болотні угіддя відіграють важливу роль у збереженні видового різноманіття рослин. Наприклад, лише в водно-болотних угіддях Азово-Чорноморського регіону налічується понад 1200 видів судинних рослин та більш ніж 220 асоціацій рослинності. Серед них росте понад 800 видів, які мають господарську цінність, включаючи понад 500 лікарських рослин. Щонайменше 15 видів підлягають міжнародній охороні, будучи занесеними до Червоного списку Міжнародного союзу

охорони природи (МСОП), Європейського червоного списку, Конвенції про збереження дикої флори та фауни і природного середовища в Європі, а також Конвенції про міжнародну торгівлю видами дикої фауни та флори, що зникають. Приблизно 30 видів рослин підлягають охороні на державному рівні, будучи занесеними до Червоної книги України. Крім того, близько 15 формацій рослинності водно-болотних угідь включено до Зеленої книги України і також потребують охорони [41].

Дніпровський екологічний коридор, який включає Дніпровські водосховища, налічує більше ніж 80 видів вищих водних рослин, що включає більшість водної флори України. В межах коридору, який перетинає різні природні зони, відбувається зміна флористичних комплексів, та їх раритетної компоненти. Флора вищих судинних рослин, за деякими підрахунками, складає понад 1000 видів [42].

Водно-болотні угіддя відіграють, також, вирішальну роль у збереженні видового фауністичного різноманіття. Ветланди забезпечують середовищем існування для численних видів ссавців, риб, комах та птахів, багато з яких є рідкісними, зникаючими чи такими, що перебувають під загрозою зникнення. Специфічні умови, за аналогією з флорою, створюють особливе середовище, яке підтримує спеціальні адаптації та взаємодію між різними видами цих біотопів [43].

Однією з найважливіших класом тварин, оселища яких знаходяться в межах водно-болотних угідь, є земноводні (Amphibia). Болота є постійними місцями проживання та розмноження для багатьох груп земноводних: тритоноподібні, жабоподібні, змієподібні, які в цих умовах живуть як у воді, так на землі чи деревах, але розмноження (відкладання ікри) відбувається з безпосередньою участю води [44].

Птахи (орнітофауна), які населяють дані території використовують ВБУ, як території постійного проживання, включаючи зимівлю, а також місця, де мігруючі види птахів роблять короткі зупинки під час перельоту (міграції) до свої типових місць гніздування [45].

У порівнянні з іншими екосистемами комплексами ВБУ мають значну цільність населення ссавцями, чим відіграють вирішальну роль у підтримці їх популяцій, забезпечуючи їх необхідним середовищем існування та ресурсами. Ветланди є важливими місцями як постійних так і тимчасових місць для розмноження, та харчування ссавців. Ці території забезпечують унікальним флористичним різноманіттям, яке підтримує харчові ніші та забезпечує укриття як для хижих так і для ссавців інших трофічних груп оскільки є стабільним джерелом води в періоди посухи, мають багато укриттів, кормової бази, тощо [5].

Загалом на території ВБУ Дніпровського екологічного коридору нараховує щонайменше 80 видів риб. Принаймні, 25 видами представлені амфібії та рептилії; фауна птахів налічує 310 видів. Багато цих видів, також, занесені до Червоної книги України та інших міжнародних червоних списків, або конвенцій. На території ВБУ Дніпровського екологічного коридору, за різними оцінками, зустрічається 300-350 видів, занесених до Червоної книги України та 34 рослинних угруповання із Зеленої книги України. Ці водно-болотні угіддя слугують оселищами для 14 видів, занесених до Червоного списку МСОП, 27 видів із Європейського Червоного списку та 14 видів, зазначених у Додатку I Бернської конвенції. Таке різноманіття фауни підкреслює важливість ВБУ для збереження біорізноманіття, зокрема рідкісних видів тварин, рослин і рослинних угруповань [42].

1.4 Розвиток сучасних супутникових систем для здійснення моніторингу земного покриву

Розвиток дистанційного зондування Землі розпочався з розвитком перших космічних технологій, коли перші супутники почали передавати інформацію про поверхню Землі. Стартом був запуск американських супутників серії *TIROS* (Television Infrared Observation Satellite) у 1960-х роках, які забезпечували метеорологічне спостереження та стали підґрунтям

для подальшого розвитку технологій моніторингу Землі [14]. *TIROS* дали початок використанню космічних даних для моніторингу, як атмосферних так і кліматичних змін, що стало важливим для подальшого розвитку технологій для моніторингу екосистем.

Значне збільшення можливостей для моніторингу екосистем відбулося з появою супутників Landsat. Місія Landsat розпочала свою роботу у 1972 році з запуском Landsat-1, та стала «проривом» у сфері моніторингу Землі, оскільки вперше дозволила отримати високоякісні багатоспектральні знімки (рис. 1), які дали можливість детально аналізувати стан різних екосистем, зокрема водно-болотних угідь [15].

Запуск місії *Landsat* розширив можливості дистанційного зондування, та став початком нової ери у вивченні екосистем. Основною метою цієї місії було спостереження за змінами на поверхні Землі, щоб дозволило отримувати унікальні дані для екологічного моніторингу. Наприклад, використання мультиспектральних зображень дало змогу аналізувати Земні покриви, в тому числі водно-болотні угіддя, та їх динаміку їх змін [16].

Протягом 1980-х і 1990-х років, корелюючи з розвитком комп'ютерних, радарних, знімальних та телекомунікаційних систем, технології дистанційного зондування значно вдосконалилися. Одним із основних досягнень цього періоду став розвиток радіолокаційних супутників. Одними з них були *ERS-1* і *ERS-2*, запущені Європейським космічним агентством (ESA). Набір інструментів *ERS-1* і *ERS-2* був зручним для досліджень в сфері геології, моніторингу льодовиків, лісових екосистем, батиметрії хвиль, метеорологічних явищ [18].

З появою програми Copernicus [19], супутників Sentinel в її рамках розвиток технологій моніторингу земних покривів ще раз вдосконалились. Місія Sentinel є важливим етапом в історії розвитку дистанційного зондування Землі (ДДЗ).

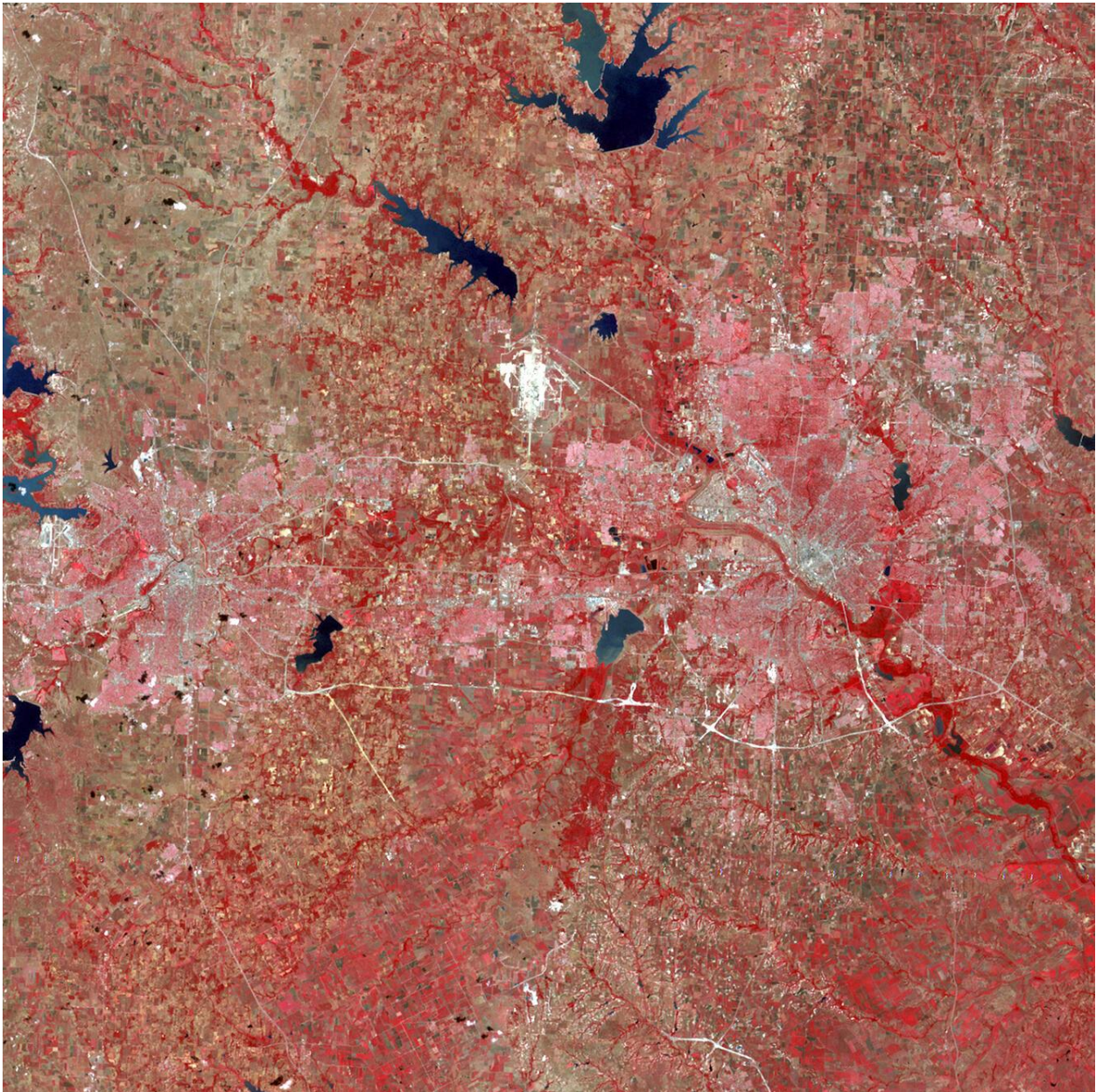


Рис. 1.1. Найперше зображення (25 липня 1972 р.) в архіві Landsat, яке показує район Далласа — Форт-Ворт у Техасі. Роздільна здатність в штучних кольорах становить 60 метрів на піксель, відтінки червоного вказують на рослинність, а сірий і білий — міські або скелясті поверхні не зайняті рослинністю [16].

Місія розроблялась для забезпечення безперервного спостереження за Землею з високою роздільною здатністю, що було значним прогресом у порівнянні з попередніми місіями. Перші супутники Sentinel були запуснені в 2014 році, та продовжують серію супутникових місій, починаючи з 1970-х

років, таких як Landsat, але мають більші можливості, та роздільну здатність. Зокрема, супутники Sentinel, на відміну від багатьох інших супутників використовують радіолокаційні та оптичні сенсори, що дозволяє отримувати дані незалежно від погоди або часу доби [19].

Sentinel характеризує етап, коли технології ДДЗ стали більш доступними і систематичними для досліджень екосистем, в тому числі й ВБУ. Програма орієнтована на багатоспектральні та радарні знімки для моніторингу не тільки суші, але й океанів, атмосфери та кліматичних змін. Це дає можливість ефективно відстежувати глобальні екологічні процеси, протягом великого проміжку часу, забезпечуючи постійну та безкоштовну передачу даних для наукових досліджень, управління природними ресурсами та реагування на надзвичайні ситуації [19].

1.5 Характеристики та порівняння знімальної апаратури супутників Landsat та Sentinel

1.5.1 Програма Landsat: Можливості знімальної апаратури

Сучасні супутники серії Landsat – це високоточні та технологічно досконалі платформи для отримання зображень Землі, котрі оснащені багатоканальними сенсорами, які забезпечують широкий спектр можливостей для моніторингу антропогенних і природних процесів. Ключовими компонентами апаратури є сенсори Operational Land Imager (OLI) та Thermal Infrared Sensor (TIRS), які разом забезпечують збір мультиспектральних та термальних даних.

OLI яким обладнані Landsat 8 і Landsat 9 здатен фіксувати електромагнітні хвилі в дев'яти спектральних діапазонах, включаючи видимий, ближній інфрачервоний (NIR), короткохвильовий інфрачервоний (SWIR), та інші діапазони (табл. 1.1). Такі можливості OLI дозволяє здійснювати комплексний аналіз земних покривів з урахуванням багатьох фізичних і біологічних характеристик об'єктів. Розрізнення каналів у

видимому (450–680 нм), ближньому інфрачервоному NIR (850–880 нм) та короткохвильовому інфрачервоному SWIR (1550–2290 нм) діапазонах забезпечує високу точність при визначенні типів ґрунтового покриття, його вологості, типів рослинності, водного режиму [20].

Таблиця 1.1

Набір дев'яти каналів сенсору OLI [30]

Номер каналу	Назва англійською	Назва українською	Діапазон (µm)	Роздільна здатність (м)
Band 1	Coastal/Aerosol	Узбережжя та аерозолі	0.43 - 0.45	30
Band 2	Blue	Синій	0.45 - 0.51	30
Band 3	Green	Зелений	0.53 - 0.59	30
Band 4	Red	Червоний	0.64 - 0.67	30
Band 5	Near-Infrared (NIR)	Близький інфрачервоний	0.85 - 0.88	30
Band 6	Shortwave Infrared 1 (SWIR 1)	Короткохвильовий інфрачервоний 1	1.57 - 1.65	30
Band 7	Shortwave Infrared 2 (SWIR 2)	Короткохвильовий інфрачервоний 2	2.11 - 2.29	30
Band 8	Panchromatic (PAN)	Панхроматичний	0.50 - 0.68	15
Band 9	Cirrus	Цирус	1.36 - 1.38	30

OLI також містить Panchromatic (панхроматичний) канал з просторовою роздільною здатністю 15 метрів, який використовується для підвищення деталізації зображень (pansharpening), що отримуються з інших спектральних каналів. Така здатність до створення зображень високої роздільної здатності забезпечує можливість проведення більш точного картографування (з роздільною здатністю 15 метрів на піксель) території і моніторингу змін у ландшафтах [21].

Інфрачервоний сенсор TIRS, присутній на Landsat 8 і Landsat 9, працює у двох каналах — 10.6–11.19 мкм та 11.5–12.51 мкм. Ці канали є термальними та мають роздільну здатність 100 метрів, що дозволяє фіксувати теплове випромінювання з поверхні Землі та використовувати ці дані для аналізу теплових потоків, визначення температурних аномалій, моніторингу вулканічної активності чи водних екосистем. Висока чутливість до теплових змін дозволяє відстежувати не лише природні макро процеси, але й наслідки людської антропогенної діяльності, зокрема у сфері промисловості та енергетики [22].

Слід зазначити, що поєднання даних, отриманих у різних спектральних діапазонах, відкриває широкі можливості для аналізу таких показників, як вегетаційні індекси (наприклад, NDVI), щільність лісових покривів, вологоутримувальна здатність ґрунту, тощо. Дані TIRS, у поєднанні з мультиспектральними даними, дозволяють проводити комплексний аналіз як на регіональному та глобальному рівнях, надаючи інформацію про зміни поверхні Землі в просторі та часі [23].

1.5.2 Програма Sentinel: Можливості знімальної апаратури

Sentinel-1 оснащений радою із синтезованою апертурою (SAR). Використання SAR в С-діапазоні (5,405 ГГц) дозволяє зберегти зображення з роздільною здатністю від 5 до 20 метрів незалежно від отримання часу і погодних умов. Такий набір можливостей забезпечує безперервний моніторинг території, особливо в регіонах з періодичною хмарністю або затіненням [24]. Радіолокаційна зйомка здатна працювати в умовах хмарності та інших атмосферних явищ, надаючи можливість аналізувати поверхню Землі у таких складних умовах, як тропічні ліси або під час сезонів дощів.

Крім того, SAR може функціонувати в кількох режимах: високої роздільної здатності (Stripmap mode), широкого охоплення (Interferometric Wide Swath mode), а також у режимі Extra-Wide Swath для великих територій.

Доступ до кількох режимів зйомки дозволяє обирати оптимальний баланс між детальністю та швидкістю покриття території а також швидкістю обробки космознімків [25].

Місія Sentinel-2 зосереджена на отриманих мультиспектральних зображеннях за допомогою сенсора, який має 13 спектральних каналів з просторовою роздільною здатністю від 10 до 60 метрів. Сенсор охоплює елементи від видимого світла до короткохвильового інфрачервоного (SWIR), що дає можливість змінювати дані про стан водних ресурсів, рослинності, урбанізовані території, тощо [26].

Таблиця 1.2

Набір каналів Sentinel-2 [32]:

Номер каналу	Назва англійською	Назва українською	Діапазон (μm)	Роздільна здатність (м)
Band 1	Coastal/Aerosol	Прибережний/Аерозольний	0.43 - 0.45	60
Band 2	Blue	Синій	0.46 - 0.52	10
Band 3	Green	Зелений	0.54 - 0.58	10
Band 4	Red	Червоний	0.65 - 0.68	10
Band 5	Red Edge 1	Червона межа 1	0.70 - 0.71	20
Band 6	Red Edge 2	Червона межа 2	0.73 - 0.74	20
Band 7	Red Edge 3	Червона межа 3	0.77 - 0.79	20
Band 8	Near-Infrared	Близький інфрачервоний	0.78 - 0.90	10
Band 8a	Red Edge 4	Червона межа 4	0.85 - 0.88	20
Band 9	Water Vapor	Водяна пара	0.94 - 0.95	60
Band 10	SWIR – Cirrus	Інфрачервоний – Циррус	1.36 - 1.39	60
Band 11	SWIR 1	Інфрачервоний 1	1.56 - 1.65	20
Band 12	SWIR 2	Інфрачервоний 2	2.10 - 2.28	20

Додаткові канали (20 і 60 метрів) використовуються для аналізу довгохвильової інфрачервоної області спектру, це дозволяє проводити дослідження стану ґрунту, водного балансу та аерозольних компонентів атмосфери. Такий набір спектрів Sentinel-2 став незамінним інструментом

для аналізу вегетації, зокрема, завдяки використанню вегетаційних індексів, таких як NDVI або EVI (Enhanced Vegetation Index), що дозволяють фіксувати найменші зміни у здоров'ї рослинного покриву, та активно використовуються як науковцями так і аграріями по всьому світу [27].

Завдяки широкій смузі захоплення (близько 290 км) та частоті зйомки кожні 5 днів, Sentinel-2 дозволяє оперативно надавати актуальні дані про стан поверхні Землі. Такий набір характеристик дозволяє спостерігати динамічні процеси, такі як зростання врожаю, поширення лісових пожеж або зміни у водних ресурсах з високою часовою точністю, що є критичним у швидкозмінних екосистемах або під час стихійних лих [28].

Загалом обидві програми надають якісні дані для мультиспектрального аналізу земної поверхні, але існують деякі суттєві відмінності у їхніх технічних характеристиках, що визначають сфери їх застосування. Наприклад, Landsat з його 16-денним циклом зйомки більше підходить для довготривалого моніторингу з історичною глибиною даних, тоді як Sentinel-2, з його 5-денним циклом, надає більш оперативні дані, що є важливим для задач швидкого реагування [29].

Кількість спектральних каналів також відрізняється: Sentinel-2 має 13 каналів, що забезпечує більш детальний аналіз у порівнянні з 11 каналами Landsat 8. Однак Landsat має більш стабільні та високоякісні термальні дані завдяки сенсору TIRS, тоді як Sentinel-2 не надає термальних зображень, що може бути критично важливим для моніторингу температури поверхні та теплових аномалій [30].

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДНОНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩ

2.1 Розроблення методики дослідження змін водноно-болотних угідь за допомогою ГІС та ДЗЗ

В умовах значного антропогенного навантаження на водно-болотні угіддя (ВБУ) Дніпровських водосховищ виникає потреба у розробленні ефективних методик моніторингу змін їхнього стану. Такий моніторинг дозволяє оперативно виявляти негативні зміни та вживати заходи для їхньої мінімізації. Основним інструментом дослідження в рамках запропонованої системи є поєднання методів геоінформаційного аналізу та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Загальна структура методики. Методика передбачає впровадження багатомодульного підходу, де кожен етап дослідження відповідає окремому модулю (рис. 2.1):

– модуль збору даних: бір вихідних даних ДЗЗ, зокрема супутникових знімків, які отримують за допомогою апаратури Sentinel та Landsat. Дані включають багатоспектральні знімки, які охоплюють різні спектральні діапазони;

– модуль формування меж ВБУ: використання розробленого алгоритму ідентифікації та уточнення меж ВБУ. Визначення меж здійснюється на основі супутникових знімків високої роздільної здатності та цифрової моделі рельєфу (ЦМР), карти глибин, а також профілю рельєфу;

– модуль первинної обробки даних включає атмосферну корекцію, покращення космознімків за допомогою процедури Pan-sharpening, а також обрізку космознімків за шаром маски який був створений на попередньому етапі і являє собою межі ВБУ;

– модуль аналізу даних: включає в себе процес керованої класифікації

та обрахунок площ основних типів наземних покривів, а також процес обрахунків індексів NDVI для демонстрації масштабів евтрофікації водної поверхні у літній період;

– модуль інтерпретації даних передбачає комплексний аналіз результатів, отриманих на основі векторних шарів, сформованих внаслідок класифікації супутникових знімків, а також статистичних даних;

– модуль формування результатів: візуалізація динаміки змін ВБУ у вигляді картографічних матеріалів, побудова графіків які відображають зміну індексу NDVI, для оцінки евтрофікації, а також таблиць, що відображають зміни площ основних наземних покривів.

Загалом використання супутникових даних Sentinel та Landsat забезпечує високу частоту спостережень і точність аналізу водно-болотних угідь завдяки спектральним характеристикам цих супутників. Інтеграція QGIS, дозволяє ефективно обробляти, аналізувати та візуалізувати отримані дані, об'єднуючи їх з різноманітних джерел. Вироблена методика є універсальною, високоефективною та автоматизованою, що дозволяє оцінювати динамічні зміни стану угідь, враховуючи вплив природних і антропогенних чинників.

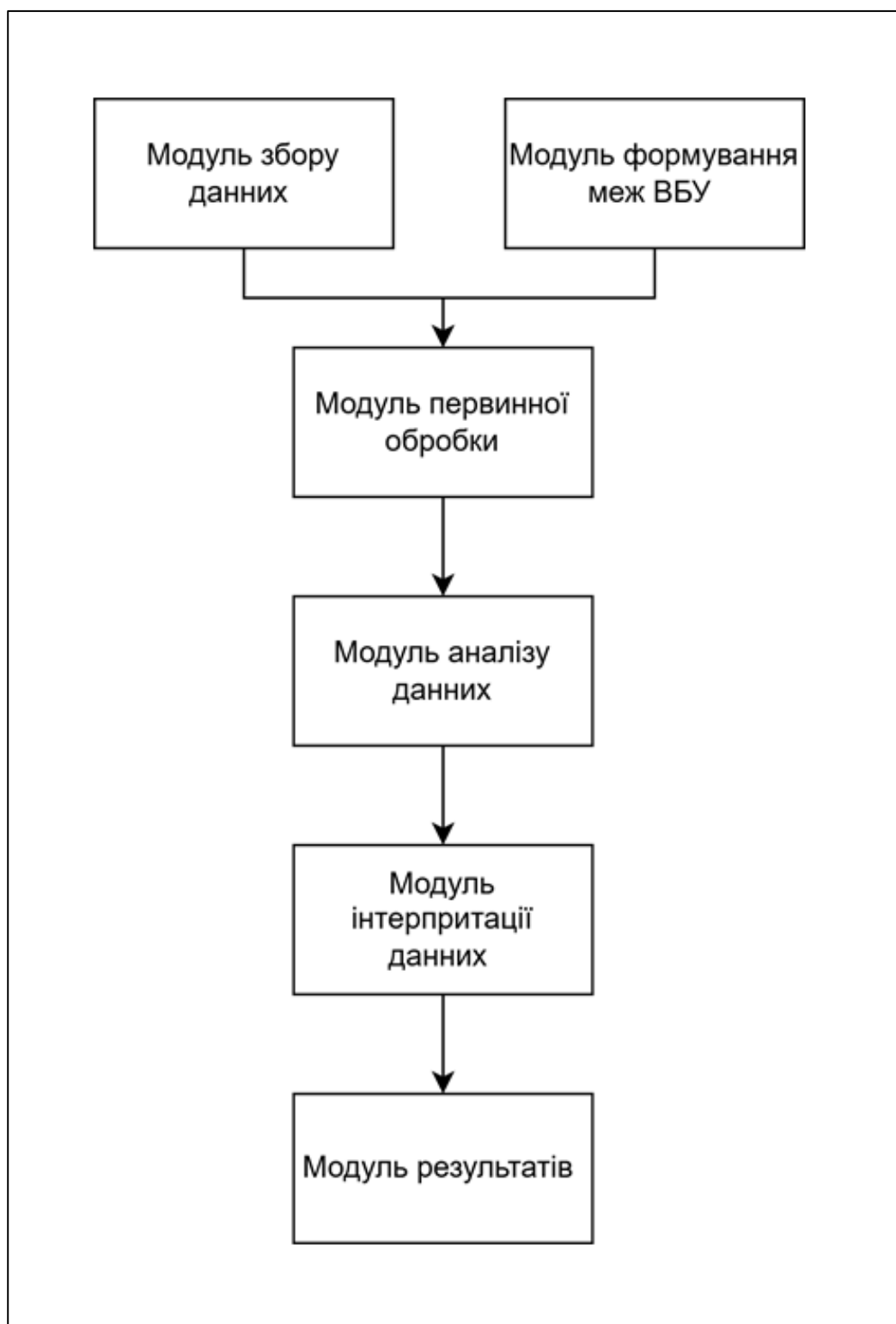


Рис.2.1. Функціональна модель системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ

2.2 Розроблення функціональної моделі системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь

Ефективний моніторинг водно-болотних угідь потребує комплексного підходу, який поєднує сучасні технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційні системи (ГІС), цифрові моделі рельєфу (ЦМР) і спеціалізовані методи обробки та аналізу супутникових даних. На основі поставлених завдань розроблено функціональну модель системи геоінформаційного моніторингу, що складається з кількох ключових етапів (рис. 2.2). Вона охоплює процеси збору, обробки, аналізу та інтерпретації даних для оцінки стану та змін ВБУ.

Джерела даних. Для реалізації моніторингу ВБУ використовуються супутникові дані з програм *Landsat* та *Sentinel*. Кожне джерело має свої переваги:

Landsat забезпечує тривалий архів даних, починаючи з 1972 року, що дозволяє досліджувати багаторічні динамічні зміни екосистем.

Sentinel, завдяки високій просторовій і часовій роздільній здатності, надає актуальні зображення, що дозволяють оцінювати сучасний стан ВБУ. Крім того, спектральні канали *Sentinel* підходять для розрахунку таких індексів, як NDWI, необхідних для аналізу водних об'єктів.

Дані супутників доповнюються інформацією із *цифрової моделі рельєфу (DEM)*, яка забезпечує глибше розуміння геоморфологічних характеристик досліджуваних територій, виокремлення їх меж.

Карта глибин слугує допоміжним джерелом даних для виокремлення меж ВБУ на акваторіях.

Профілі рельєфу, слугує для цифрової моделі рельєфу (DEM), допоміжним джерелом виокремлення геоморфологічних характеристик ВБУ: заплав, перших надзаплавних терас.

Попереднє опрацювання даних. На цьому етапі проводиться географічна вибірка супутникових знімків у межах досліджуваних територій. Це передбачає:

Обрізання супутникових зображень згідно з межами водно-болотних угідь, визначеними за допомогою ЦМР та інших допоміжних даних.

2. *Використання для підготовки знімків* до подальшого аналізу, зокрема інструменту Semi-Automatic Classification Plugin (SCP).

Аналіз даних - це ключовий етап роботи з супутниковими знімками. Він включає два основні підходи:

Класифікація даних: супутникові знімки Landsat обробляються з метою визначення класів земного покриття. Застосовується керована класифікація, яка дозволяє виділити основні типи поверхонь на територіях ВБУ.

Розрахунок NDWI (Normalized Difference Water Index): цей індекс розраховується на основі даних Sentinel і використовується для аналізу масштабів евтрофікації водної поверхні окремо виокремлених ВБУ.

Інтерпретація результатів. Оброблені та проаналізовані дані інтерпретуються з метою створення кінцевих результатів, зокрема:

Тематичних карт, які відображають просторовий розподіл та екологічний стан ВБУ.

Графіків змін евтрофікації, які дозволяють оцінити зміни в екологічному стані водойм за вегетаційним індексом.

Опис функціональної моделі. Загалом, функціональна модель організована таким чином, щоб забезпечити максимальну автоматизацію процесів обробки та аналізу даних. Вона дозволяє ідентифікувати зміни у межах ВБУ, оцінити рівень евтрофікації водойм, визначити ризики деградації цих екосистем.

Особливості моделі:

- інтеграція різних типів даних (оптичних, рельєфних та індексних).
- орієнтація на зручність використання для моніторингу як науковцями, так і екологами-практиками.

– можливість масштабування моделі на інші водосховища та території, що входять до складу Дніпровського каскаду.

Практична значимість. Розроблена модель дозволяє оцінювати екологічний стан ВБУ в реальному часі та аналізувати довгострокові зміни. Це важливо для прийняття рішень у сфері охорони довкілля, збереження біорізноманіття та раціонального використання водних ресурсів.

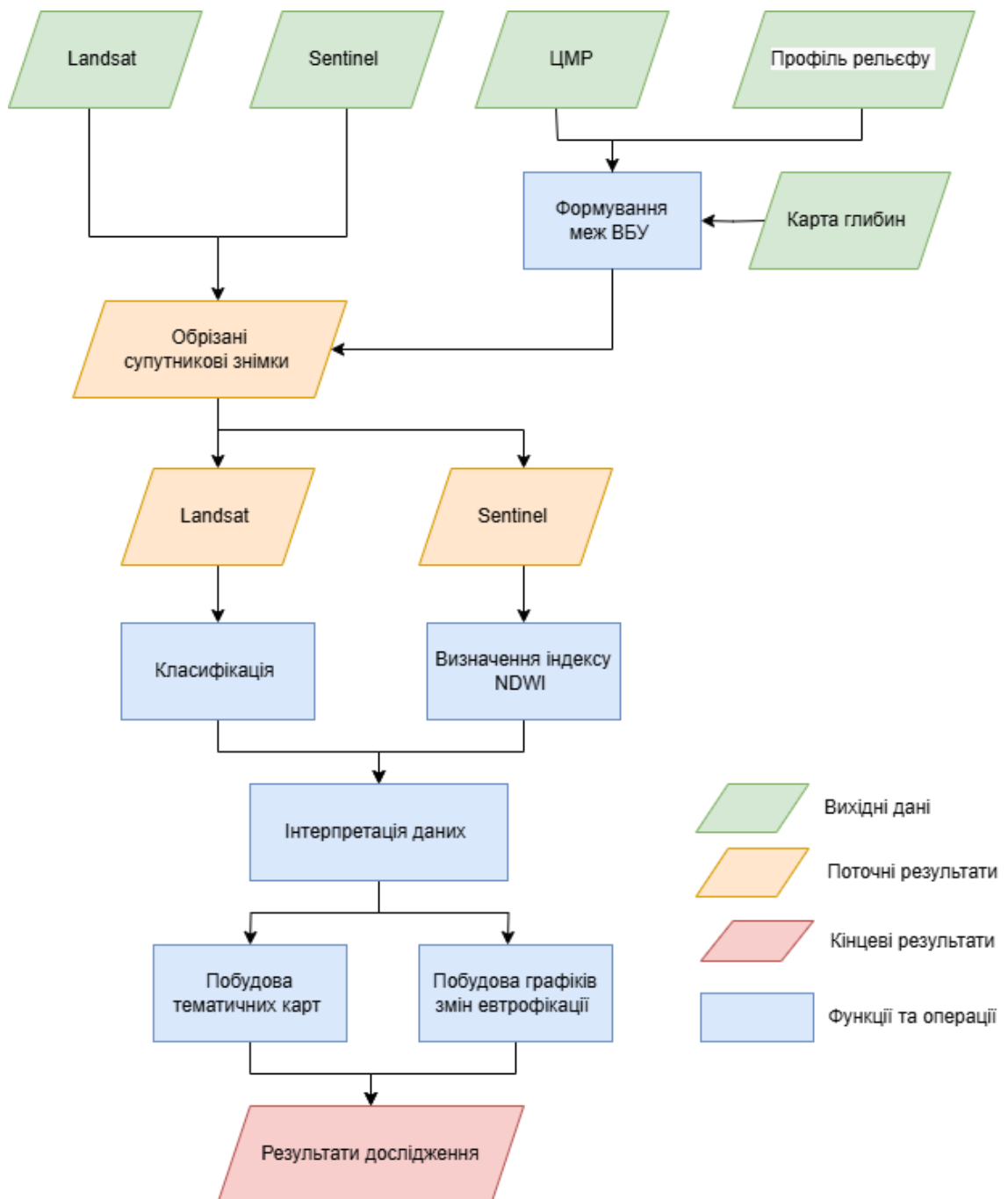


Рис. 2.2. Блок-схема здійснення геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ

2.3 Опис вихідних даних дослідження

Для реалізації системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь (ВБУ) Дніпровських водосховищ у роботі використовуються вихідні дані, які охоплюють широкий спектр джерел дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а також допоміжну геопросторову інформацію. Основним завданням при формуванні бази вихідних даних є забезпечення високої точності та надійності отриманої інформації для оцінки стану водно-болотних екосистем, їхньої динаміки та екологічного значення.

Всі дані умовно поділяються на кілька груп:

1) *Супутникові знімки*: дані програм Landsat (Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, Landsat 9, дані супутників Sentinel-2 (Sentinel-2A та Sentinel-2B).

2) *Цифрова модель рельєфу (DEM)*: використовується для визначення топографічних особливостей території. В даній роботі цифрові моделі рельєфу (SRTM) із просторовою роздільною здатністю 30 метрів були отримані за допомогою модуля «OpenTopography DEM Downloader» у середовищі QGIS.

3) *Допоміжна геопросторова інформація*:

- Шейп-файли (Shapefile) меж ВБУ.
- Карти глибин водойм України. Карта глибин слугує допоміжним джерелом даних для виокремлення меж ВБУ на акваторіях [54].

4) *Розрахункові дані*. Інформація про вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

5) Супутникові знімки Landsat[81;82]. Програма Landsat, започаткована у 1972 році, є одним із найважливіших джерел даних для екологічного моніторингу завдяки її тривалості, регулярності та спектральним можливостям.

Для цього дослідження використовуються знімки наступних супутників [81]:

1) *Landsat 5:*

- Дата запуску: 1984 рік.
- Основний сенсор: ТМ (Thematic Mapper).
- Спектральний діапазон: 7 каналів, включаючи тепловий інфрачервоний.

2) *Landsat 7:*

- Дата запуску: 1999 рік.
- Основний сенсор: ЕТМ+ (Enhanced Thematic Mapper Plus).
- Спектральний діапазон: 8 каналів, включаючи панхроматичний для підвищення просторової роздільної здатності.

3) *Landsat 8:*

- Дата запуску: 2013 рік.
- Основні сенсори: ОЛІ (Operational Land Imager) та ТІРС (Thermal Infrared Sensor).
- Спектральний діапазон: 11 каналів.

4) *Landsat 9:*

- Дата запуску: 2021 рік.
- Поліпшена версія Landsat 8 із покращеною точністю вимірювань і збереженням тих самих спектральних характеристик.

Таблиця 2.1

Характеристика спектральних каналів Landsat [81;82]

Супутник	Канал	Спектральний діапазон (мкм)	Призначення
Landsat 5	1	0,45–0,52	Синій канал: водні об'єкти, рослинність
	2	0,52–0,60	Зелений канал: здоров'я рослинності
	3	0,63–0,69	Червоний канал: біомаса, ґрунти
	4	0,76–0,90	Ближній ІЧ: вологість, біомаса
	5	1,55–1,75	Середній ІЧ: водний стрес, ґрунти

	6	10,40–12,50	Тепловий ІЧ: температура поверхні
	7	2,08–2,35	Середній ІЧ: породи, мінерали
Landsat 7	8	0,52–0,90 (панхроматичний)	Панорамний канал: висока роздільна здатність
Landsat 8/9	1	0,43–0,45	Аерозолі
	2	0,45–0,51	Синій канал: водні об'єкти, рослинність
	3	0,53–0,59	Зелений канал: здоров'я рослинності
	4	0,64–0,67	Червоний канал: біомаса, ґрунти
	5	0,85–0,88	Ближній ІЧ: вологість, біомаса
	6	1,57–1,65	Середній ІЧ: водний стрес, ґрунти
	7	2,11–2,29	Середній ІЧ: породи, мінерали
	8	0,50–0,68 (панхроматичний)	Панорамний канал: висока роздільна здатність
	9	1,36–1,38	Хмари
	10	10,60–11,19	Тепловий ІЧ: температура поверхні
	11	11,50–12,51	Тепловий ІЧ: температура поверхні

Супутникові знімки Sentinel-2 [32;82]:

- Дата запуску: 2015 рік (Sentinel-2A), 2017 рік (Sentinel-2B).
- Основний сенсор: MSI (Multispectral Instrument).
- Спектральний діапазон: 13 каналів, включаючи видимий, ближній інфрачервоний та короткохвильовий інфрачервоний.
- Особливості: Висока просторово-часова роздільна здатність (до 10 м) із періодом повторюваності до 5 днів при комбінованій роботі Sentinel-2A та Sentinel-2B, що забезпечує детальний моніторинг змін наземного покриву.

Таблиця 2.2

Набір каналів Sentinel-2 [32]

Номер каналу	Назва англійською	Назва українською	Діапазон (µm)	Роздільна здатність (м)
Band 1	Coastal/Aerosol	Прибережний/Аерозольний	0.43 - 0.45	60
Band 2	Blue	Синій	0.46 - 0.52	10

Band 3	Green	Зелений	0.54 - 0.58	10
Band 4	Red	Червоний	0.65 - 0.68	10
Band 5	Red Edge 1	Червона межа 1	0.70 - 0.71	20
Band 6	Red Edge 2	Червона межа 2	0.73 - 0.74	20
Band 7	Red Edge 3	Червона межа 3	0.77 - 0.79	20
Band 8	Near-Infrared	Близький інфрачервоний	0.78 - 0.90	10
Band 8a	Red Edge 4	Червона межа 4	0.85 - 0.88	20
Band 9	Water Vapor	Водяна пара	0.94 - 0.95	60
Band 10	SWIR – Cirrus	Інфрачервоний – Циррус	1.36 - 1.39	60
Band 11	SWIR 1	Інфрачервоний 1	1.56 - 1.65	20
Band 12	SWIR 2	Інфрачервоний 2	2.10 - 2.28	20

Такий набір даних дозволяє сформуванні бази вихідних даних є забезпечення високої точності та надійності отриманої інформації для оцінки стану водно-болотних екосистем, їхньої динаміки та екологічного значення.

РОЗДІЛ 3. ГЕОМОРФОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ФОРМУВАННЯ МЕЖ ВБУ ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩ НА ОСНОВІ ЦМР

3.1 Розроблення методики формування меж ВБУ на прикладі Київського водосховища

Для аналізу змін водно-болотних угідь (ВБУ) Дніпровських водосховищ необхідним є чітке визначення їхніх меж. Відповідно до Рамсарської конвенції[3], чітких параметрів ВБУ не існує, а такі як склад рослинного покриву, гідрологічні умови, тощо є змінними та можуть відрізнятися залежно від типу ВБУ. Ця мінливість ускладнює встановлення чітких меж та потребує індивідуального підходу для кожної ділянки, що підлягає дослідженню.

Спираючись на реконструкцію природнього русла Дніпра, до затоплення [53], можна припустити, що території з особливим гідрологічним режимом та флористичними угрупуваннями були розміщені переважно по заплавах річки, що охоплювали основне русло, стариці, а також прилеглі низькі ділянки першої надзаплавної тераси, за якими й варто було б проводити межу ВБУ для річки в її природньому стані.

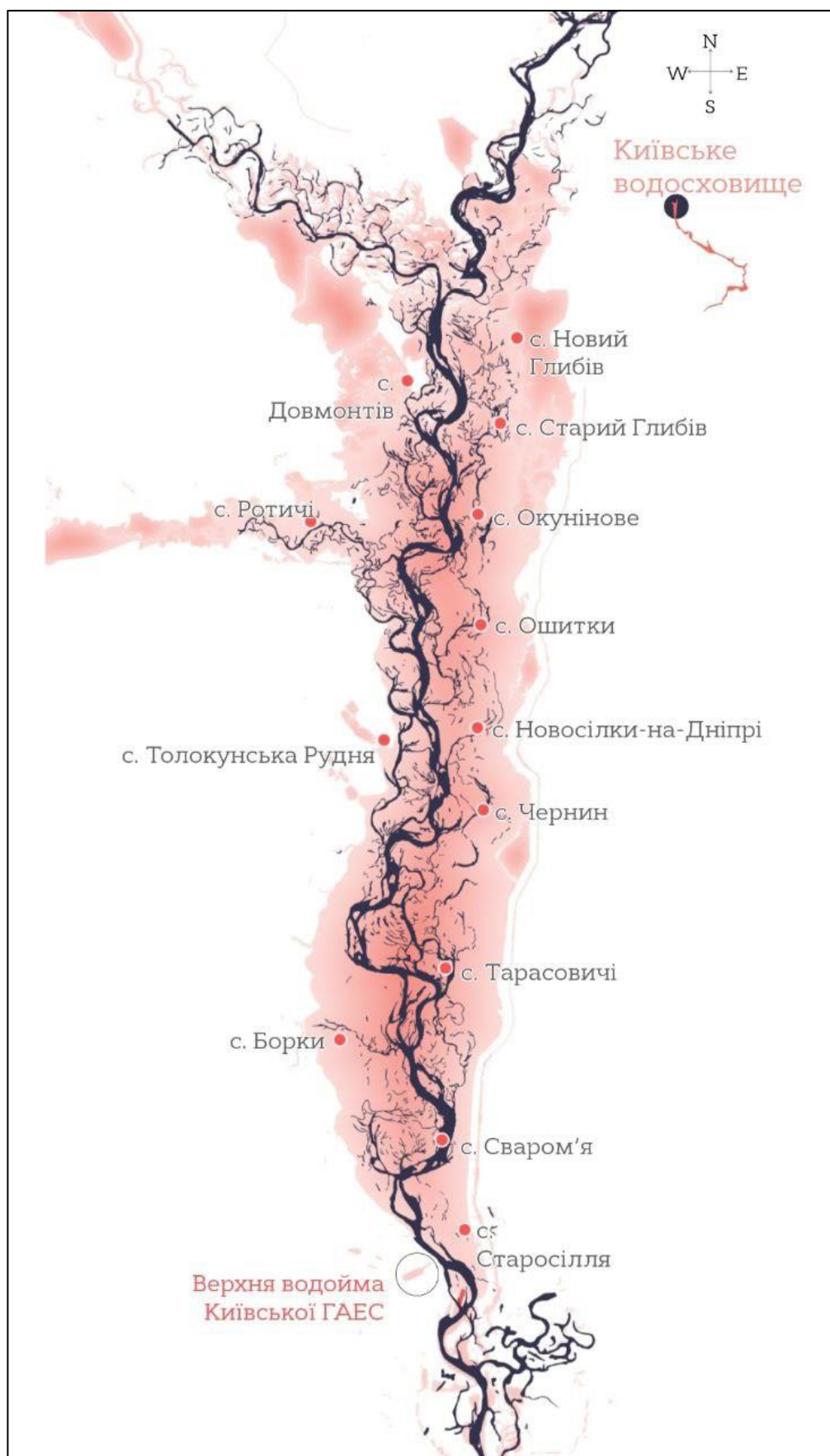


Рис. 3.1. природне русло Дніпра разом із старицями та дельтами приток на території Київського водосховища [53]

Після аналізу даної карти, спираючись на значну кількість стариць та їх фрагментованість, можна припустити, що територія, яка була затоплена внаслідок будівництва Київської ГЕС характеризувалися періодичним затопленням під час паводків, що сприяло формуванню типових водно-болотних екосистем. Таким чином, ВБУ охоплювали не тільки прируслову, а й динамічні заплавні ділянки, що перебували у безпосередній близькості до річки, отже мали відповідні екосистемні комплекси.

Після спорудження Київського водосховища та каскаду інших водосховищ значна частина заплавних територій була затоплена, що спричинило підвищення сезонного рівня води. Як наслідок, змінилися фактичні межі водно-болотних угідь (ВБУ). Аналіз рельєфу, виконаний за допомогою інструментів Google Earth Pro, показав, що нормальний підпірний рівень (НПР) води знаходиться на позначці 98 метрів над рівнем моря. Висока роздільна здатність космічних знімків дозволяє чітко ідентифікувати гідрофітні флористичні угруповання, які займають низинні прибережні ділянки.

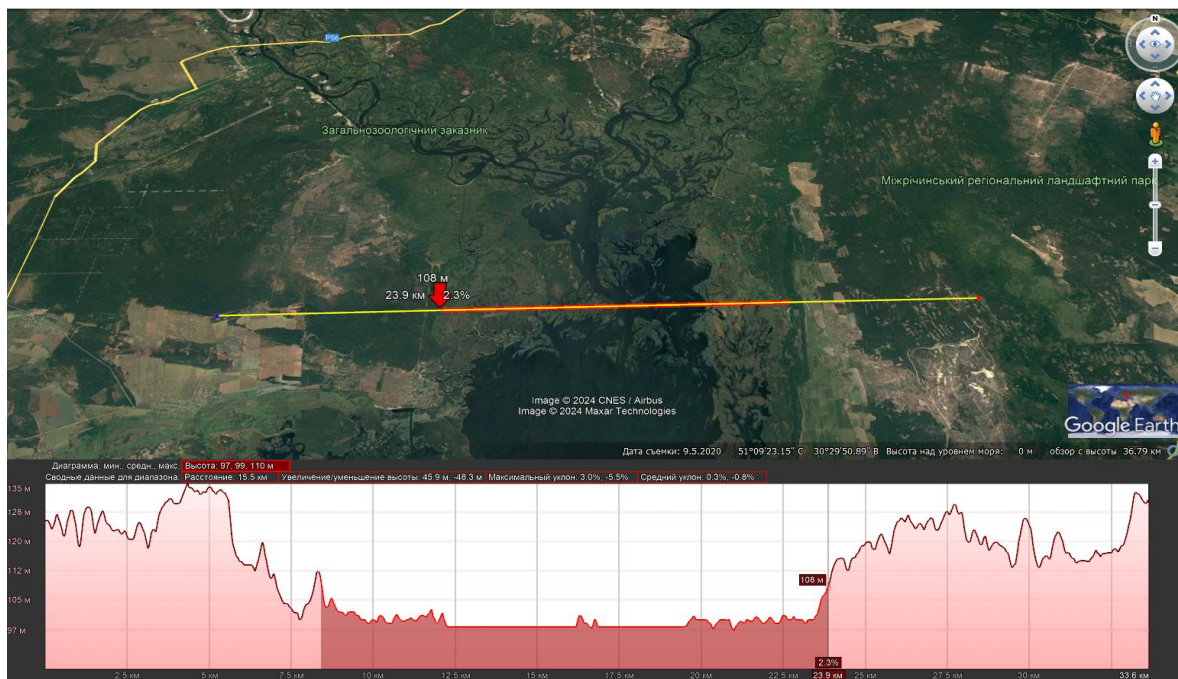


Рис 3.2. Профіль рельєфу на території верхів'я Київського водосховищ, виконаний за допомогою інструментів Google Earth Pro

Кореляція цих даних із численними старицями, островами та сильно фрагментованою береговою лінією, зокрема в дельтах Дніпра та Прип'яті, підтверджує наявність широкої заплавної зони. Заплава цієї території охоплює ділянки від урізу води (близько 98 метрів над рівнем моря, залежно від сезонності та НПР, встановленого на гідроелектростанціях) до зон з різким підвищенням рельєфу (108-112 м. над рівнем моря). Це підвищення є як уступом надзапальної тераси, так і брівкою заплави, що позначає межу між заплавою та надзапальною частиною рельєфу. За даними космічних знімків, на цих підвищених територіях сформувалися інші флористичні угруповання, які значно відрізняються від гідрофітних асоціацій прибережних ділянок, тому на цій ділянці можна проводити межу визначених ВБУ.

Єдина конкретна рекомендація щодо параметрів водно-болотних угідь (ВБУ), подана в Рамсарській конвенції, стосується глибини – до 6 метрів. Тому, визначаючи межі ВБУ, необхідно враховувати цей показник. Аналіз карти глибин (див. рисунок 4 [54]) показує, що Київське водосховище має максимальні глибини до 15 метрів, і такі ділянки не можуть бути включені до дослідження.

Доцільним рішенням було б розмежувати акваторію на більш та менш глибоководні зони, використовуючи барометричну модель дна, яка є аналогом цифрової моделі рельєфу. Однак, файли з метаданими, що дозволили б застосувати цей підхід у геоінформаційних системах, наразі відсутні у відкритому доступі. У зв'язку з цим раціональним методом стає розмежування водосховища на верхню (мілководну) частину, глибини якої показані на рисунку 3.4, та нижню (глибоководну) частину, глибини якої представлені на рисунку 3.5.

Такий підхід, хоча й має обмеження в точності, враховуючи наявність глибоководних ділянок у русловій частині Дніпра навіть у верхів'ї водосховища, але є прийнятним для демонстрації загальної динаміки водно-болотних угідь у межах досліджуваної акваторії.

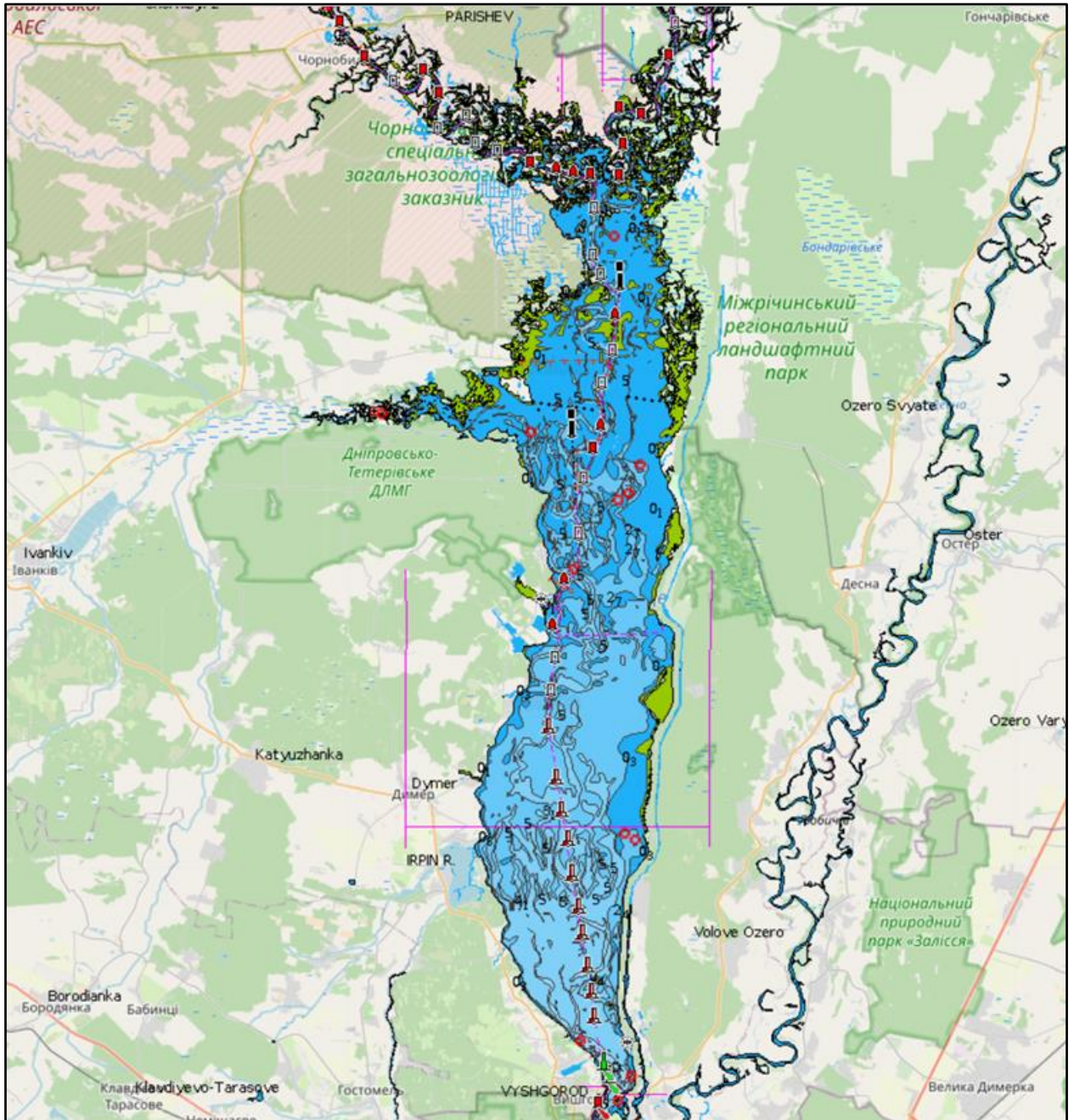


Рис. 3.3. Карта глибин Київського водосховища [54]



Рис. 3.4 Карта глибин верхньої ділянки Київського водосховища [54]

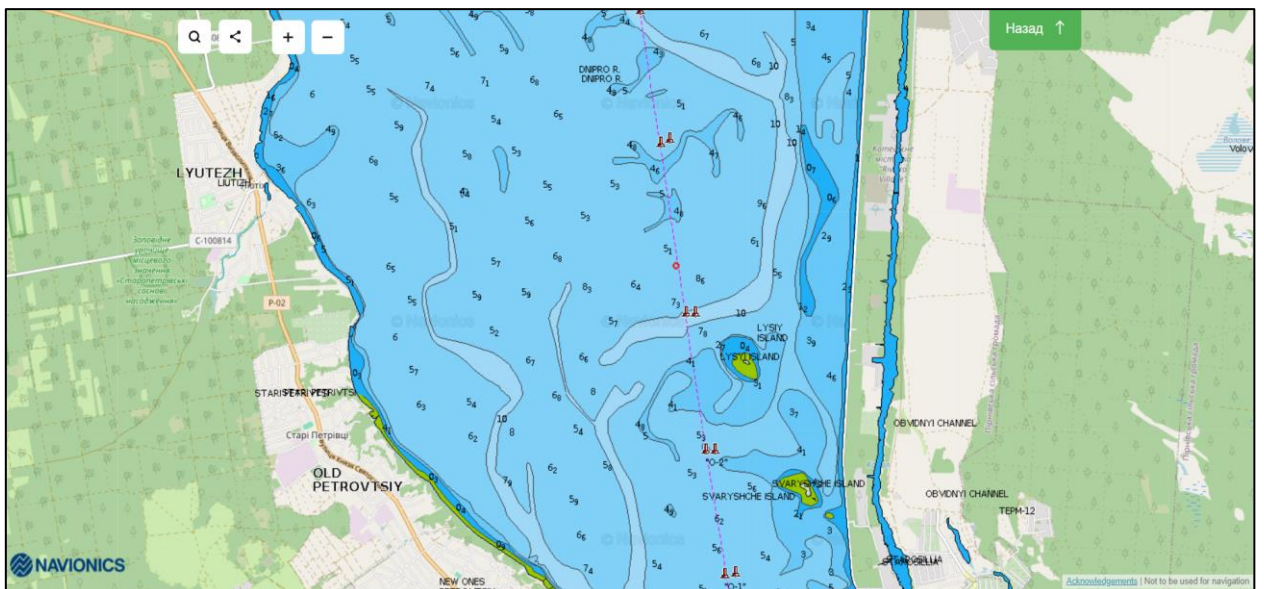


Рисунок 3.5. Карта глибин нижньої ділянки Київського водосховища [54]

На основі цієї інформації можна розробити методику визначення меж ВБУ із застосуванням цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Метод передбачає кореляцію рельєфних даних з розподілом флористичних угруповань на суходолі та попереднє окреслення меж ВБУ на акваторіях за допомогою онлайн-карт глибин [54].

Цифрові моделі рельєфу (SRTM) із просторовою роздільною здатністю 30 метрів були отримані за допомогою модуля «OpenTopography DEM

Downloader» у середовищі QGIS. Інтерфейс модуля та результати обробки наведені н рисунках 3.6 і 3.7 відповідно. Отримані моделі були візуалізовані із застосуванням кольорового градієнта, що оптимально відображає особливості геоморфологічної структури досліджуваної території.

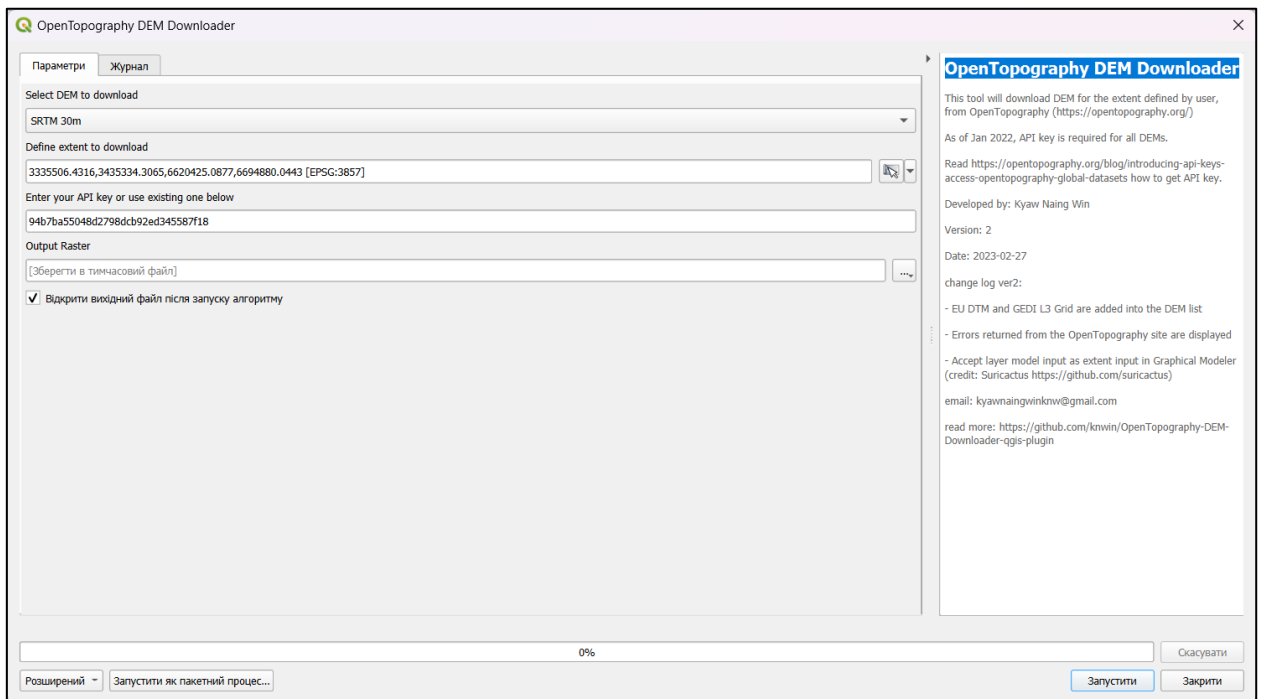


Рис. 3.6. модуль OpenTopography DEM Downloader

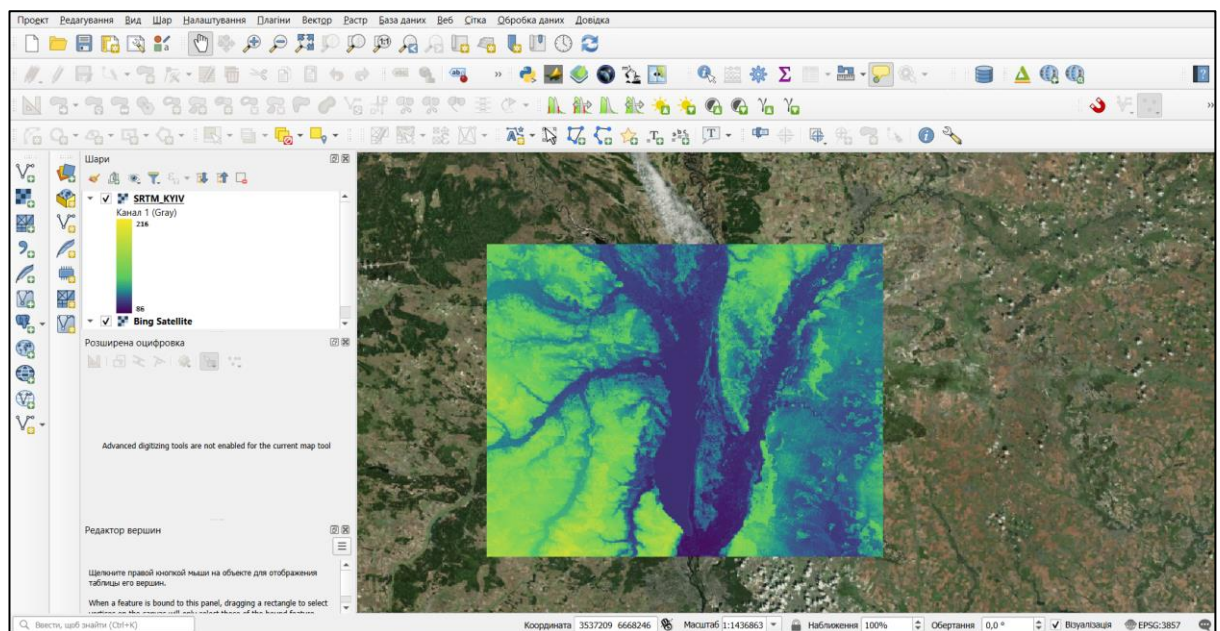


Рис. 3.7. SRTM, на територію верхів'я Київського водосховища, завантажена

за допомогою модуля «OpenTopography DEM Downloader»

Наступним етапом дослідження стало формування шейп-файлу (SHP) з межами водно-болотних угідь (ВБУ) для верхньої мілководної частини Київського водосховища, який подано на рисунку 3.8. В підсумковому файлі ВБУ охоплюють вершину водосховища та охарактеризовані складною геоморфологічною структурою, що включає відроги Дніпра і Прип'яті, а також Тетерівську затоку. На півночі межі угідь були обмежені державним кордоном з Республікою Білорусь (дані були отримані за допомогою плагіна QuickMapServices), на півдні — дельтою річки Тетерів і селом Лошакова Гута, що обумовлено середнім зниженням глибин нижче за течією. Західні та східні межі проходять переважно по територіях заплав і частково по першій надзаплавній терасі.

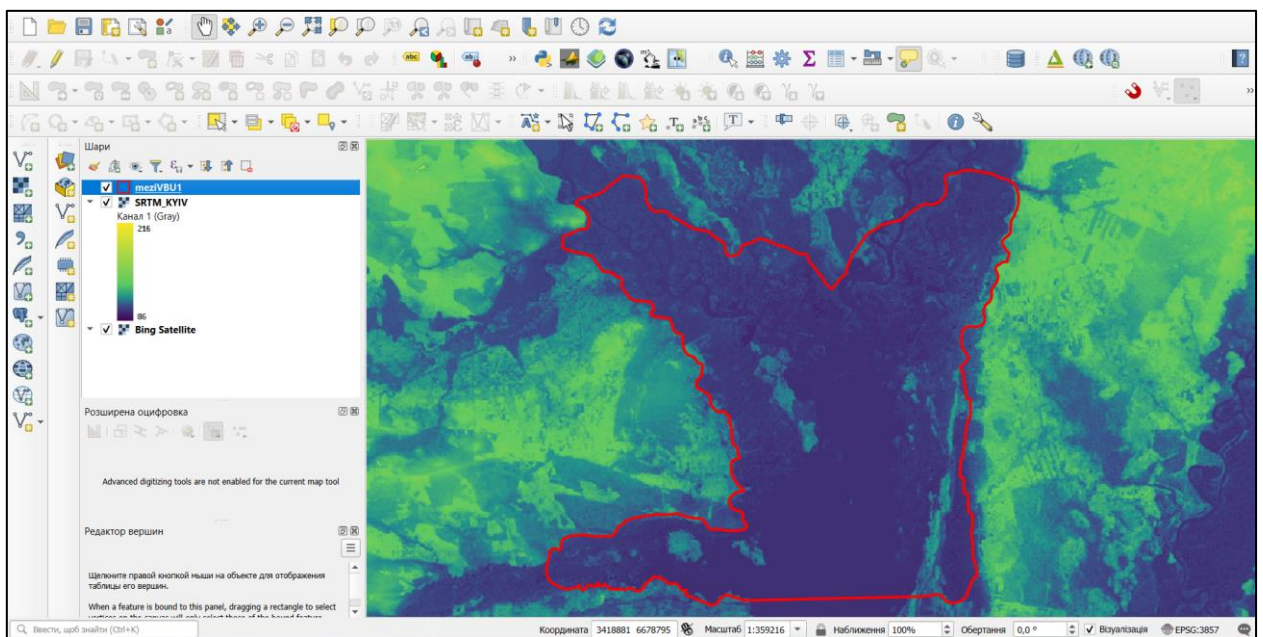


Рис. 3.8. Межі ВБУ верхів'я Київського водосховища

Процес формування SHP-файлу здійснювався вручну відповідно до розробленої методики, що базувалася на використанні цифрової моделі рельєфу та супутникових знімків для визначення точних меж ВБУ. У результаті отримано шейп-файл із чітко окресленими межами досліджуваних територій, що охоплюють як прибережні, так і затоплені ділянки. Цей файл

слугуватиме як макетом для обрізки космоснімків для подальшого аналізу, та моніторингу екосистемних змін.

3.2 Формування меж інших ВБУ дніпровських водосховищ

Для окреслення меж деяких інших водно-болотних угідь, які планується використовувати для подальшого аналізу, застосовувалася аналогічна методика. У результаті проведених досліджень були виділені водно-болотні угіддя верхньої та середньої частини Канівського водосховища (рис. 3.9), а також верхня ділянка Кременчуцького водосховища (рис. 3.10).

Після аналізу території та виокремлення ВБУ, можна сказати, що вони охоплюють верхню та середню частини Канівського водосховища, його острови та прибережні. На півночі межі можна обмежити Південним містом у місті Києві, тоді як західна та східна границі проходять через прилеглі населені пункти, переважно села, розташовані на першій надзаплавній терасі. Така просторово-структурна організація демонструє тісний взаємозв'язок природних та антропогенних компонентів, що є критичним для оцінки екологічного стану водно-болотних угідь.

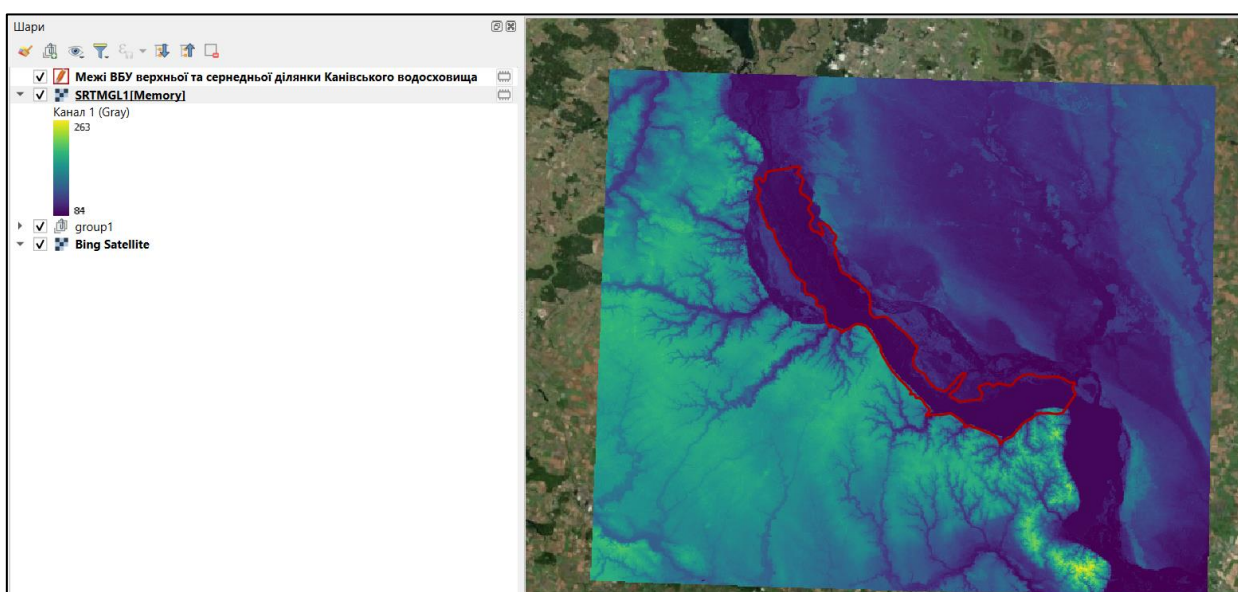


Рис. 3.9. Межі ВБУ верхньої та середньої ділянки Канівського водосховища

Для ВБУ Кременчуцького водосховища була обрана ділянка його верхів'я. Ця область охоплює ділянки, які представлені низинними зонами з підвищеною вологістю. Західна та східна межі території проходять через райони, переважно зайняті сільськогосподарськими угіддями і лісами, що свідчить про змішану природно-антропогенну структуру, нижче по течії територія обмежена акваторіями глибина яких становить менше шести метрів.

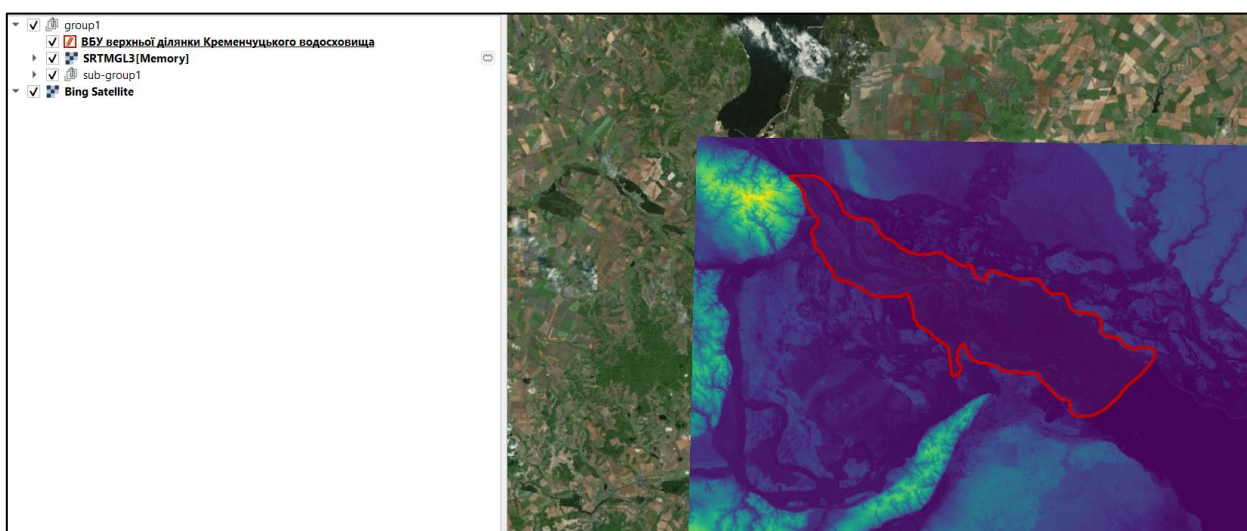


Рис 3.10. Межі ВБУ верхньої ділянки Кременчуцького водосховища

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ

4.1 Отримання даних дистанційного зондування Землі

Завантаження даних. На даному етапі здійснено відбір і завантаження космічних знімків, які є основою подальшого аналізу, зокрема методом їх класифікації, для оцінки змін ВБУ, та обрахунку вегетаційних індексів, для оцінки масштабів евтрофікації. Зокрема, були відібрані зображення з місії Landsat, отримані з архіву Геологічної служби США (USGS) через платформу Earth Explorer (рис. 4.1) [55], а також знімки із серії Sentinel, доступні з офіційного джерела Європейського космічного агентства — Copernicus Open Access Hub (рис. 4.2) [56]. Ці знімки забезпечують дані високої просторової та спектральної роздільної здатності, що дозволяє здійснювати глибокий аналіз досліджуваних територій.

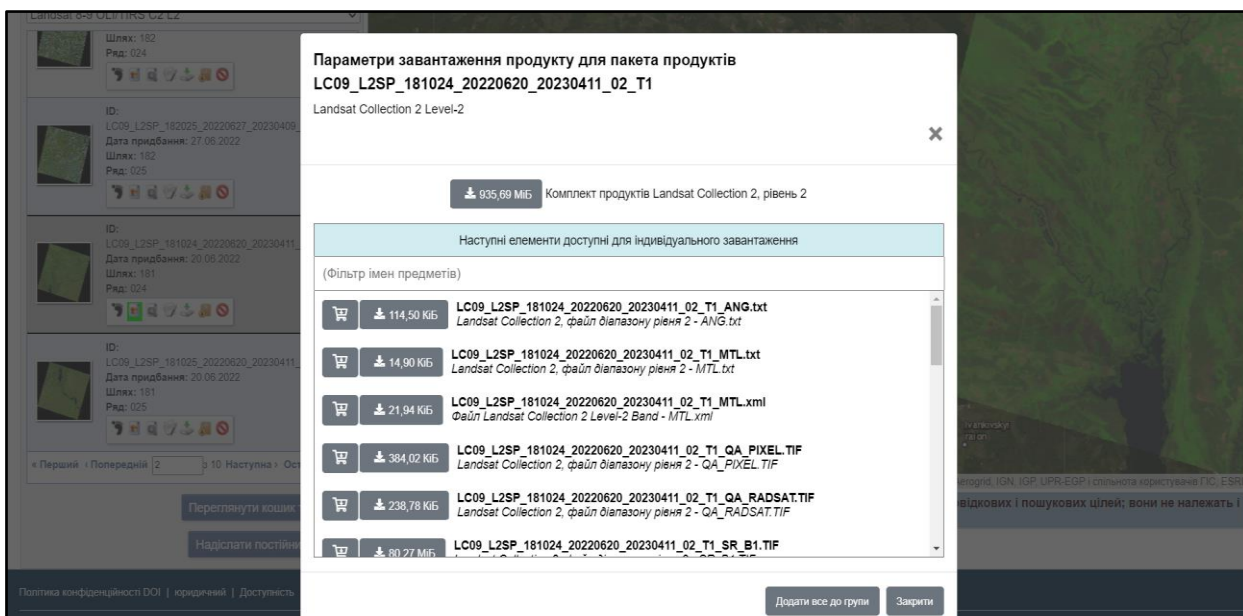


Рис. 4.1. Завантаження космознімки місії Landsat з архіву Геологічної служби США

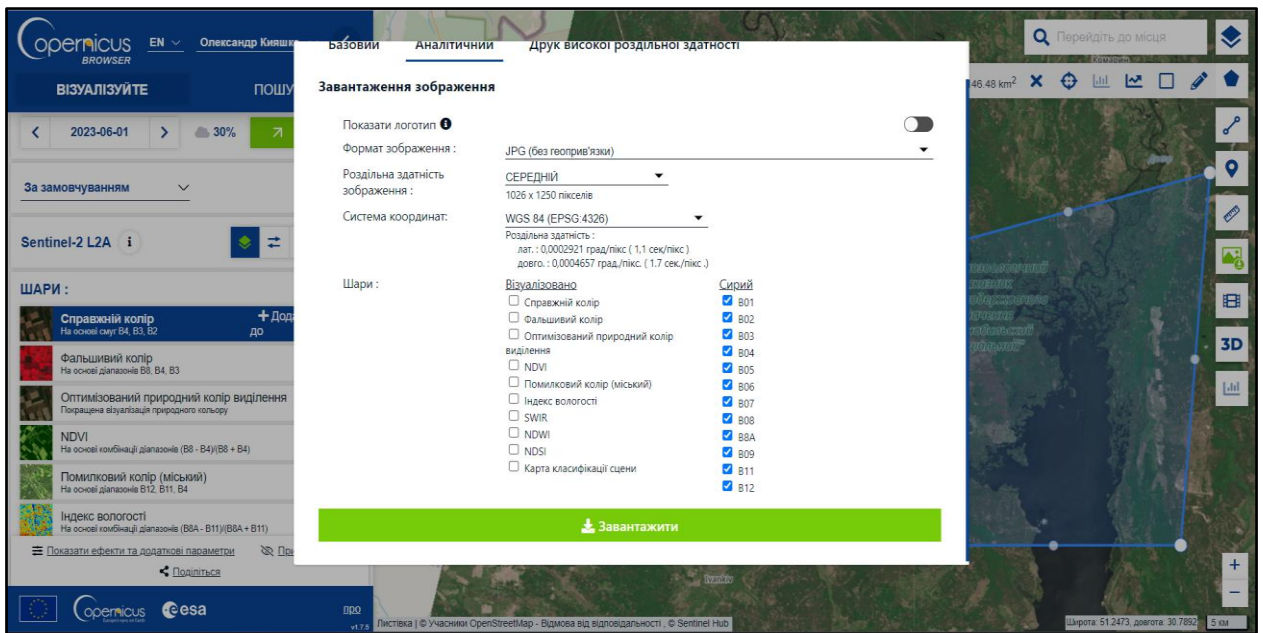


Рис. 4.2. Завантаження космознімків Sentinel з офіційного ресурсу Європейського космічного агентства

Для забезпечення подальшої обробки даних, архіви зображень, отримані у форматі GeoTIFF, були розпаковані та підготовлені до аналізу. Формат GeoTIFF є стандартом для зберігання геопросторової інформації, який дозволяє зберігати не тільки самі зображення, але й додаткові метадані, такі як географічна прив'язка, що надзвичайно важливо для точного картографічного відображення та сумісності з геоінформаційними системами (ГІС).

4.2 Попереднє опрацювання космічних знімків та методи їх покращення

На початковому етапі обробки космічних знімків було здійснено їх обрізку з використанням стандартного інструментарію для обробки растрових форматів даних у програмному забезпеченні QGIS. Цей процес дозволив суттєво зменшити обсяг файлів, що оптимізувало подальшу обробку, зокрема скоротило час обчислень та полегшило маніпуляції з

даними.

Варто зазначити, що для коректної роботи з усіма спектральними каналами космічного знімка після його розпакування необхідно створити мультиспектральний растр у середовищі QGIS. Це зумовлено тим, що в процесі розпакування дані зазвичай зберігаються у вигляді окремих файлів для кожного спектрального каналу, що унеможливорює їх комплексне використання без попередньої обробки. Формування мультиспектрального растру дозволяє інтегрувати ці канали в єдиний файл, оптимізуючи подальший аналіз і забезпечуючи доступ до всіх спектрів знімка в межах одного растрового шару.

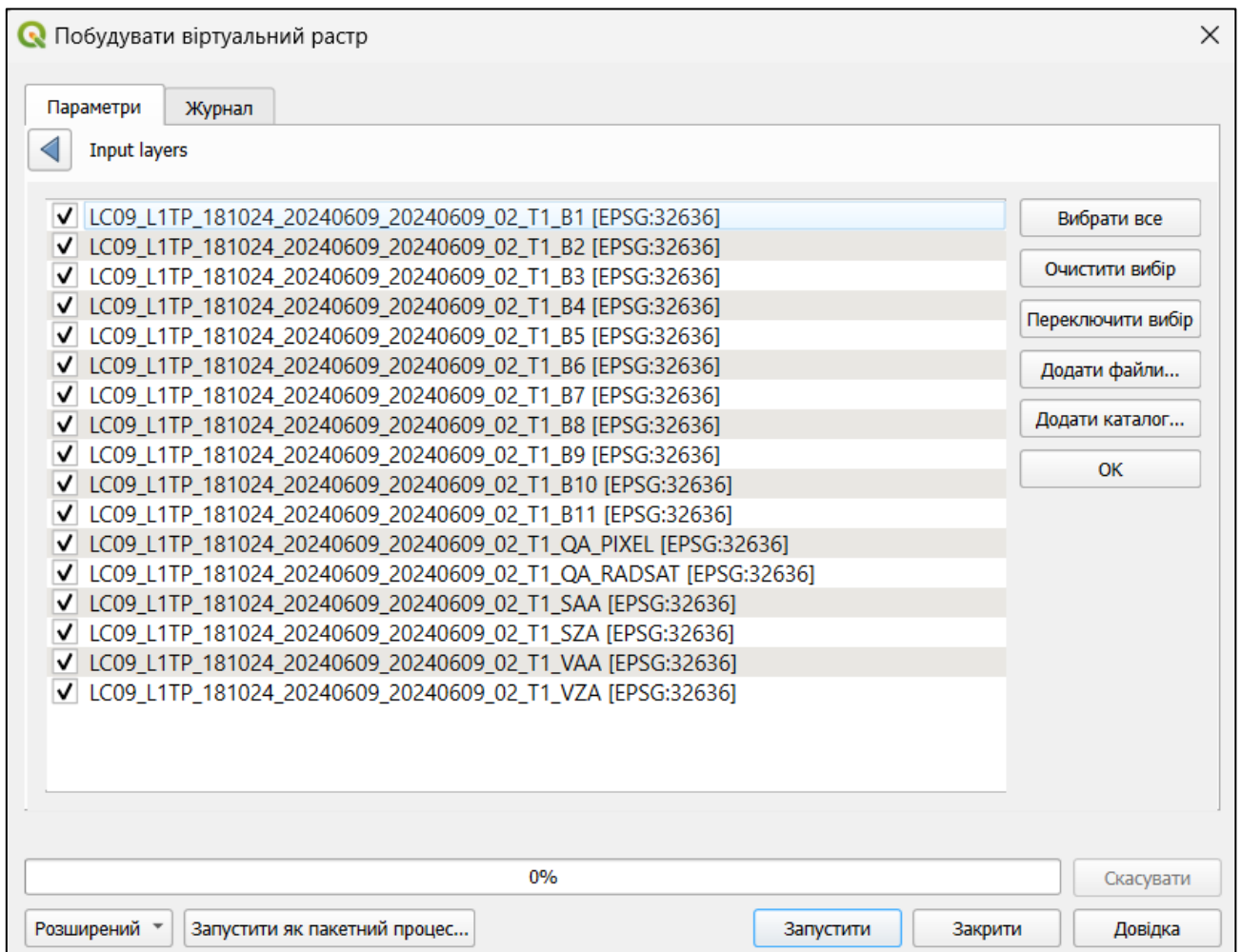


Рис. 4.3. Процес формування віртуального растру в середовищі QGIS.

4.3 Застосування інструменту Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)

Попередня обробка космічних знімків – це комплекс процедур, спрямованих на усунення спотворень, які можуть впливати на якість даних дистанційного зондування. Такі спотворення зумовлюються різними факторами, зокрема:

- недосконалістю реєстраційної апаратури;
- впливом атмосфери на електромагнітне випромінювання;
- перешкодами під час передачі даних каналами зв'язку;
- геометричними спотвореннями, обумовленими специфікою орбітальної зйомки;
- змінами умов освітлення підстильної поверхні;
- артефактами, що виникають у процесі фотохімічної обробки та аналого-цифрового перетворення (при роботі з фотографічними матеріалами) [37].

Для забезпечення високої точності та придатності зображень для подальшого аналізу необхідно виконати низку коригувальних операцій. Одним із ефективних інструментів для таких задач є «Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)» – безкоштовний і відкритий плагін для QGIS. SCP забезпечує завантаження, попередню обробку та аналіз даних дистанційного зондування, а також інтегрує можливості для пошуку та імпорту даних із супутників «Landsat» і «Sentinel-2» [57].

Функціональні можливості SCP:

Плагін надає інструменти для виконання навчальної класифікації, видалення шуму, підвищення контрасту та зменшення розміру даних. Після класифікації можна сформувати карту класів, яка відображає розподіл різних категорій на території (наприклад, типів земельного покриття чи рослинності).

Для виконання поставлених завдань у SCP було використано такі важливі процедури:

1) «Pan-sharpening» – підвищення просторової роздільної здатності мультиспектральних знімків за рахунок комбінування з панхроматичним каналом.

2) «Атмосферна корекція» – процес поліпшення радіометричних характеристик знімка шляхом усунення впливу атмосфери, що може викликати спотворення спектральних сигналів. Це дозволяє отримати точніші дані про підстильну поверхню. Дана процедура була виконана за допомогою SCP і проілюстрована на рисунку 3.8 [58].

Особливу увагу слід приділити підключенню файлу метаданих у форматі «MTL». Цей файл містить важливі параметри зйомки, такі як інформація про умови освітлення та калібрувальні коефіцієнти, необхідні для коректного виконання атмосферної та радіометричної корекції [57].

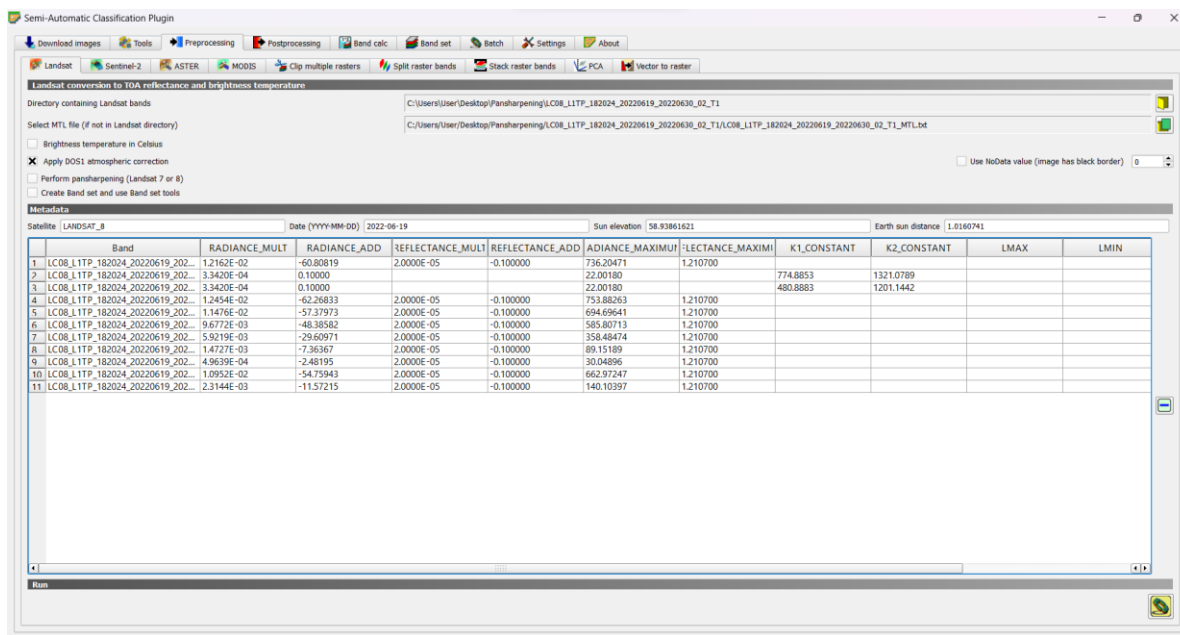


Рис. 4.4. Процес атмосферної корекції за допомогою плагіна «Semi-Automatic Classification Plugin»

Після закінчення процедури можна сформувати мультиспектральний космознімок, та порівняти результати (порівняльні зображення подані на рисунках 4.5 – 4.6; 4.7 -4.8).

Якщо порівнювати космічні знімки до та після атмосферної корекції, то можна помітити наступні відмінності:

Кольори. Атмосферна корекція підвищує точність відтворення кольорів на знімках, роблячи їх більш насиченими та природними. Це полегшує розпізнавання різних об'єктів та покращує візуальну інтерпретацію, що є важливим етапом для подальшої обробки, зокрема під час виконання класифікації.

Контрастність. Завдяки атмосферній корекції збільшується контрастність зображення, що сприяє покращенню видимості дрібних деталей. Це особливо корисно при аналізі складних або неоднорідних територій, де важливо точно відобразити різницю між об'єктами.

Шуми. Корекція також дозволяє зменшити кількість шумів на знімку, що підвищує загальну якість даних. Це, у свою чергу, зменшує похибки при подальшому аналізі та класифікації об'єктів, забезпечуючи більш точні результати.

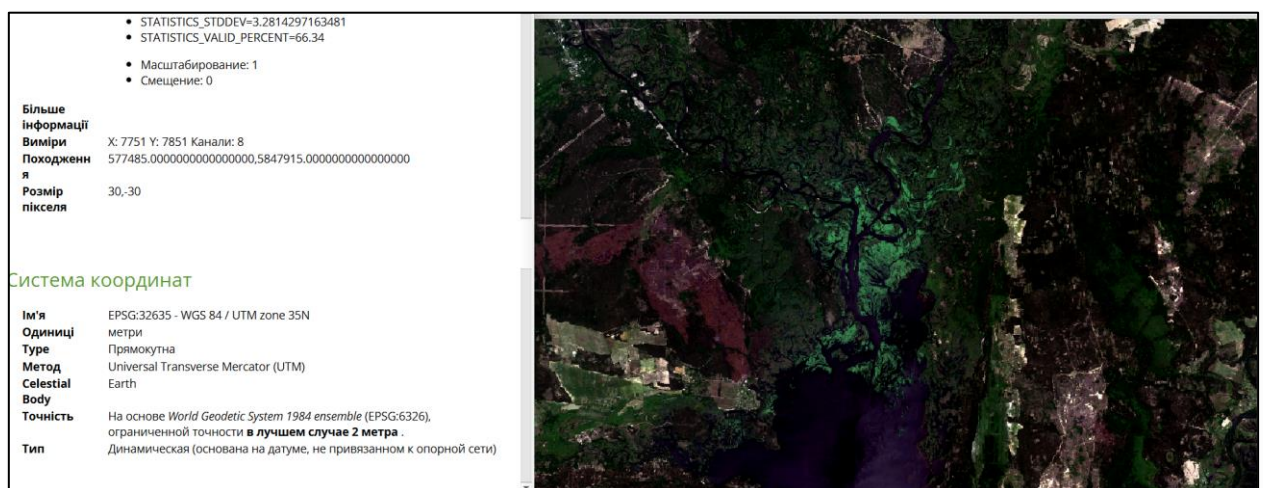


Рис. 4.5. Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B4;B3;B2) до атмосферної корекції

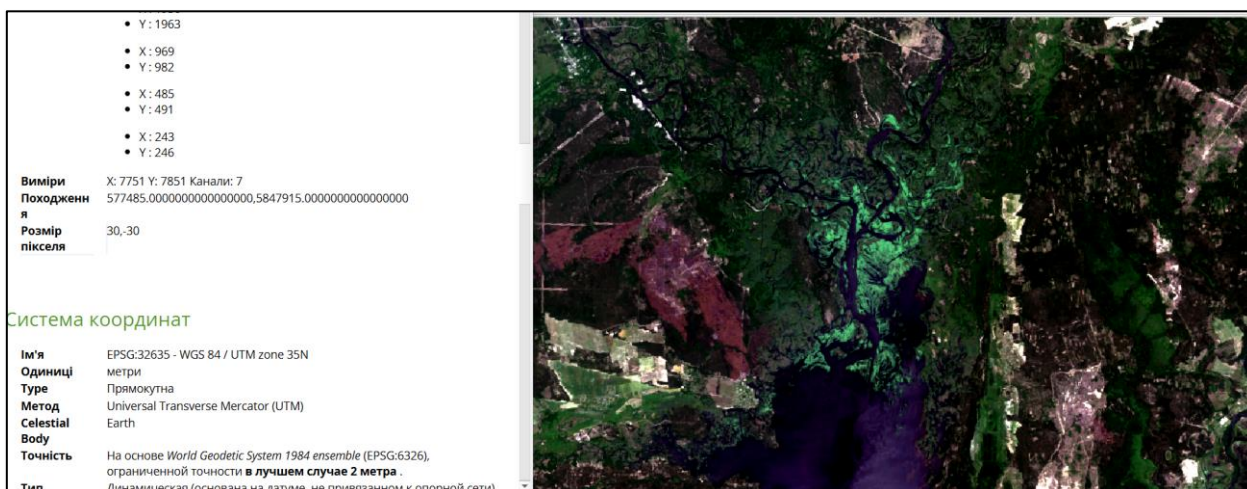


Рис. 4.6. Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B4;B3;B2) після атмосферної корекції

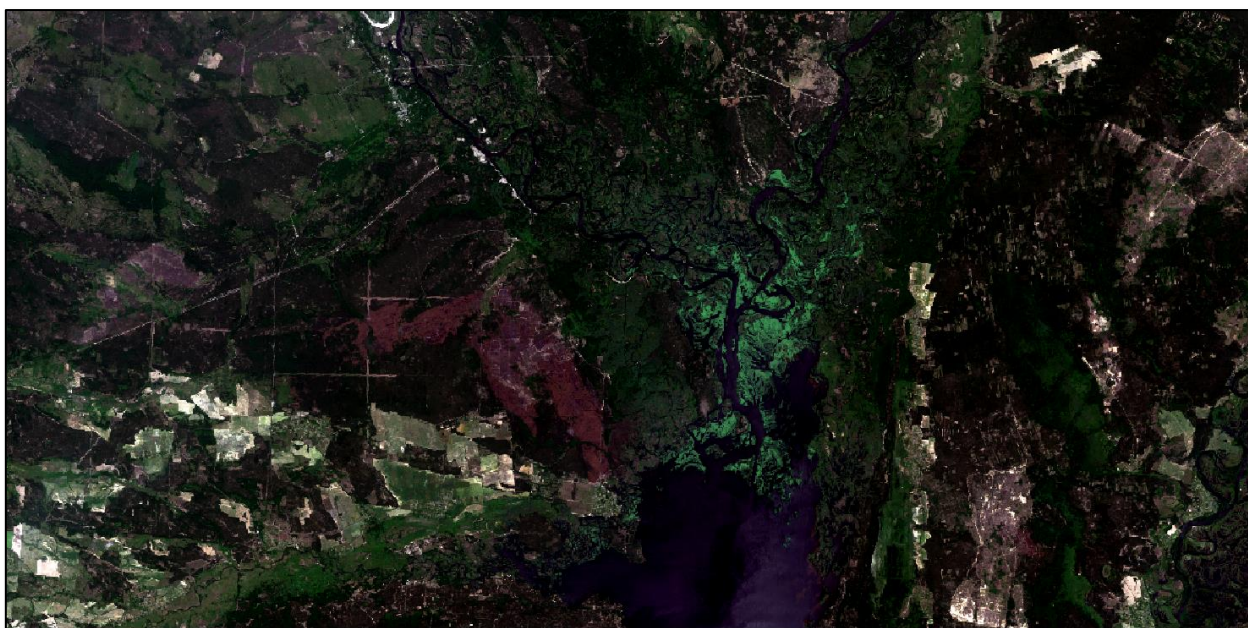


Рис. 4.7. Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B4;B3;B2) до атмосферної корекції



Рис. 4.8. Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B4;B3;B2) після атмосферної корекції

Pan-sharpening – це процес інтеграції спектральної інформації з каналів мультиспектральних діапазонів із панхроматичним діапазоном (PAN), що має вищу просторову роздільну здатність. Для супутників Landsat мультиспектральні канали характеризуються роздільною здатністю 30 м, тоді як панхроматична смуга для Landsat 7, Landsat 8 та 9 забезпечує роздільну здатність 15 м. Результатом є мультиспектральне зображення, що поєднує спектральні властивості оригінальних каналів з покращеною роздільною здатністю, еквівалентною панхроматичній смузі [57].

Цей процес дозволяє отримати деталізовані зображення з високою точністю, що є важливим для аналізу об'єктів і класифікації територій. Виконання *pan-sharpening* у середовищі Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) забезпечує ефективне поєднання каналів, а також подальшу обробку зображень. При цьому файл метаданих у форматі MTL підключається окремо для врахування параметрів зйомки та коректної калібрації [58]. Процедура представлена на малюнку 4.9.

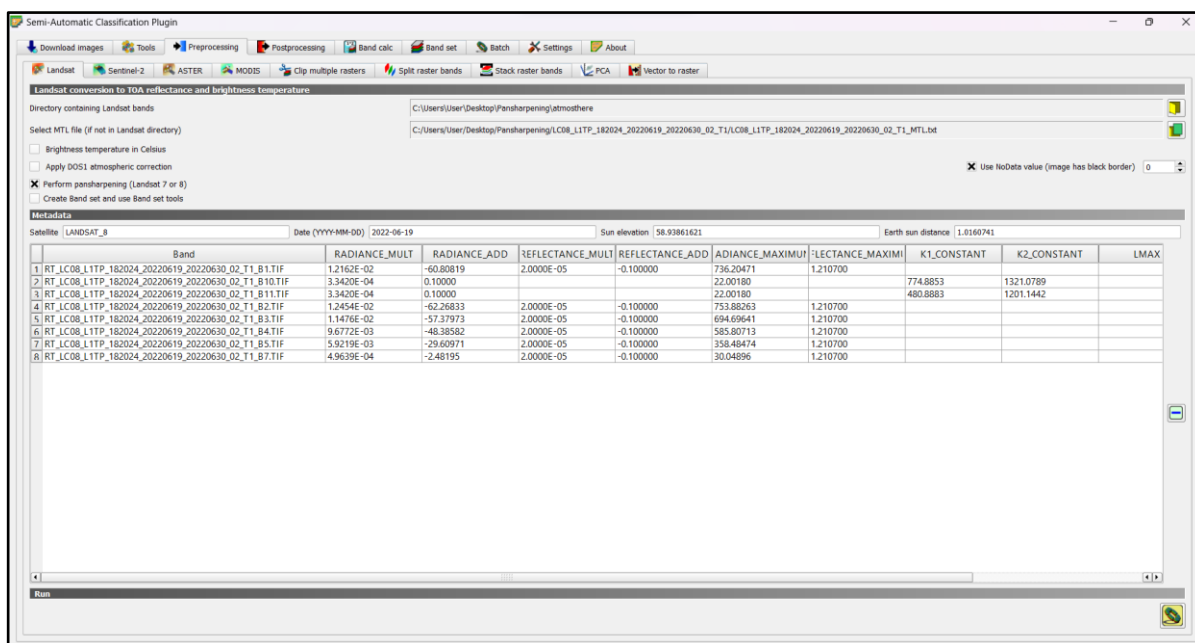


Рис. 4.9 Процес процедури Pansharpening за допомогою плагіна «Semi-Automatic Classification Plugin»

Після завершення процедури Pan-sharpening формується мультиспектральний космічний знімок з покращеними характеристиками, що дозволяє виконати порівняння з вихідними даними. Порівняльні зображення представлені на рисунках 4.10–4.11 та 4.12–4.13.

Після застосування Pan-sharpening знімки Landsat демонструють такі покращення:

- *Кольори.* Насиченість і точність кольорів помітно підвищуються, що сприяє чіткому розрізненню об'єктів на зображенні та полегшує візуальну інтерпретацію.

- *Контрастність.* Збільшення контрастності забезпечує поліпшену видимість дрібних деталей, що є важливим при аналізі складних територій або дрібномасштабних структур.

- *Роздільна здатність.* Просторова роздільна здатність значно підвищується, що дозволяє отримувати більш деталізовані результати. Для Landsat після Pan-sharpening розмір пікселя зменшується з 30 м до 20 м, що підвищує якість картографування та точність інтерпретації об'єктів.

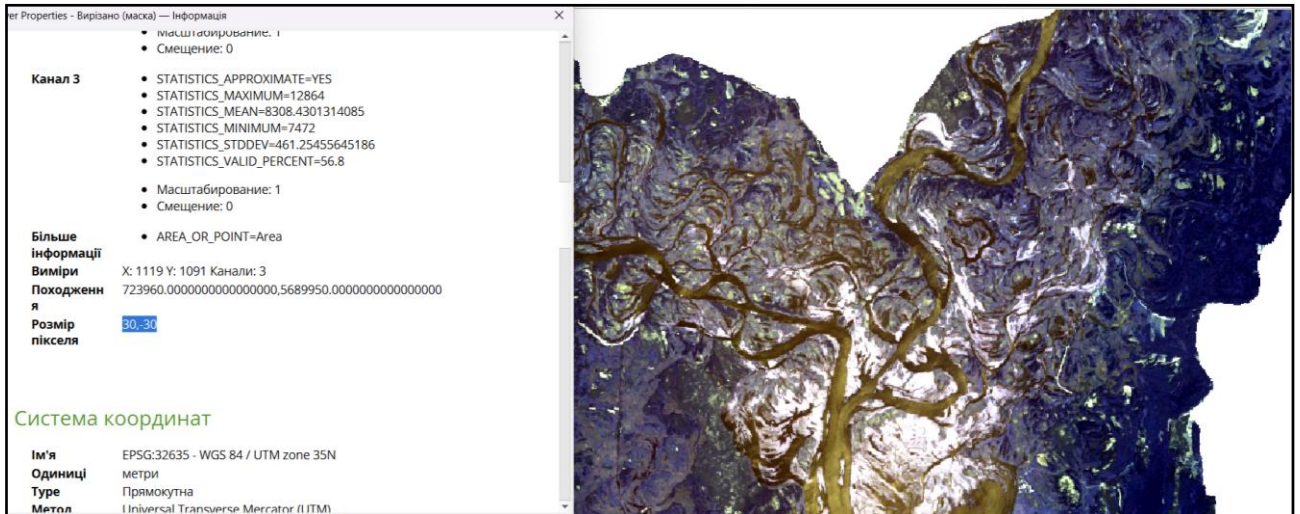


Рис. 4.10. Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B4;B3;B2) до процедури Pansharpening

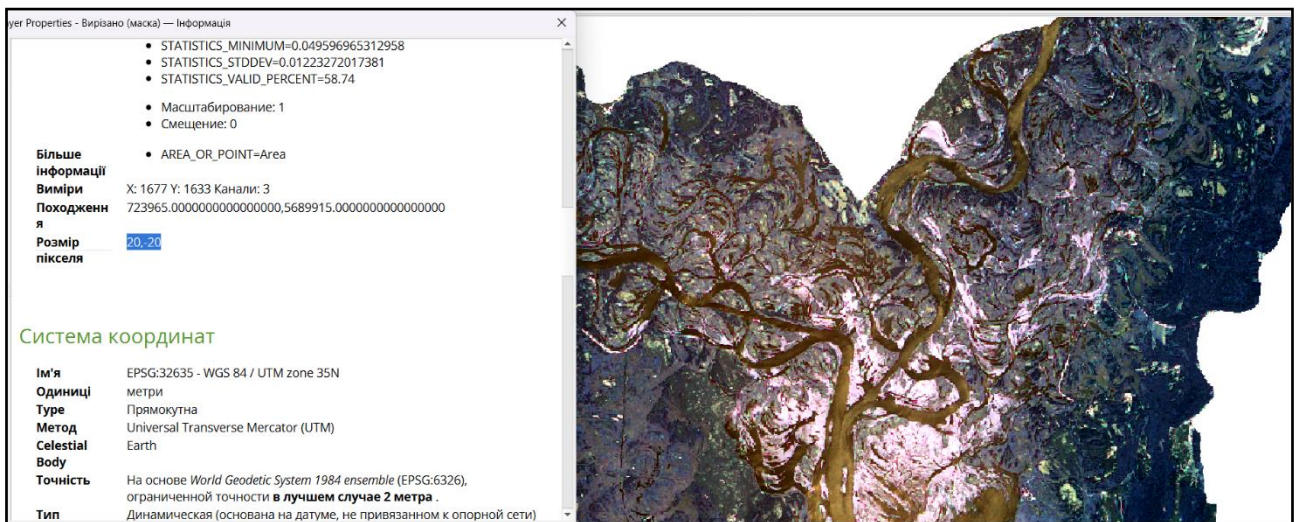


Рис. 4.11 Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B4;B3;B2) після процедури Pansharpening

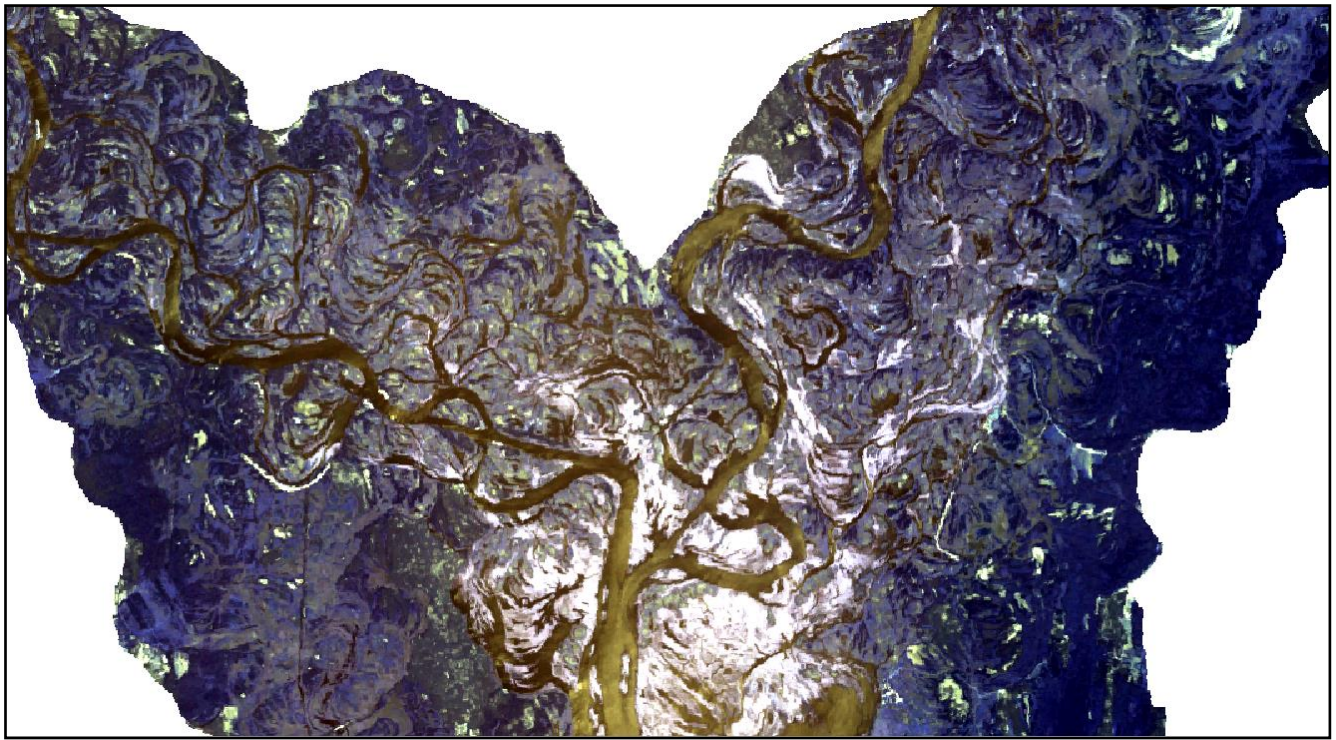


Рис 4.12 Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B1;B2;B3) до процедури Pansharpening



Рис. 4.13 Мультиспектральний космознімок Landsat-8 (B1;B2;B3) після процедури Pansharpening

4.4 Керована класифікація супутникових знімків

Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (FAO) розробила систему класифікації наземного покриття, на основі якої в 2009 році Центром спільних досліджень (Joint Research Center) та Європейським космічним агентством було створено Глобальну карту наземних покриттів (GlobCover2009) [60]. Ця карта охоплює земну поверхню з просторовою роздільною здатністю 300 метрів, що робить її ефективним інструментом для глобальних екологічних досліджень. Проте GlobCover2009 не забезпечує достатньої деталізації для детального аналізу структурно фрагментованих або специфічних екосистем, таких як водно-болотні угіддя. У рамках GlobCover2009А було представлено стандартизовані класифікатори для визначення типів земельних покриттів, що дають змогу дистанційно ідентифікувати як однорідні елементи (наприклад, трав'яні покриття, водні поверхні, ліси, урбанізовані зони тощо), так і комбінації елементарних територій, які разом формують інтегровані структури наземного покриття [59].

З розвитком технологій та природоохороних ініціатив почав використовуватися зовсім інші підходи до розробки класифікаторів екосистем, при яких найменшою картографічною одиницею розглядається середовище існування або біотоп [59]. Однак визначити видовий склад рослинних угруповань за даними супутникової зйомки є проблематичним, але типові флористичні угруповання, місця розташування яких прямо корелюється з іншими ландшафтними характеристиками визначити цілком реально, тому класифікація, яка проведена в даному дослідженні побудована на угрупованнях.

Ціллю класифікації є дослідження трансформації ВБУ в просторі та часі. Часовий проміж має бути якомога ширшим, тому базуєтворюючими є космознімки місії LANDSAT – найтривалішого проекту з отримання супутникових космознімків планети Земля. Супутник Landsat-5 був

запущений 1 березня 1984 року, та мав суттєве покращення знімальної апаратури в порівнянні з попередніми супутниками місії[61]. Завдяки якісному покращенню сенсорів даного супутника точність даних які будуть отримані в процесі класифікації космознімків не суттєво відрізнятимуться в порівнянні з супутниками Landsat-7/8/9 за точністю, а отже порівняння буде більш репрезентативним. Ціллю класифікації є дослідження трансформації ВБУ в просторі та часі. Часовий проміж має бути якомога ширшим, тому базують космознімки місії LANDSAT – найтривалішого проекту з отримання супутникових космознімків планети Земля. Супутник Landsat-5 був запущений 1 березня 1984 року, та мав суттєве покращення знімальної апаратури в порівнянні з попередніми супутниками місії [61]. Завдяки якісному покращенню сенсорів даного супутника точність даних які будуть отримані в процесі класифікації космознімків не суттєво відрізнятимуться в порівнянні з супутниками Landsat-7/8/9 за точністю, а отже порівняння буде більш репрезентативним. Саме з цієї причини перші космічні знімки для подальших досліджень датуються 1985 роком.

Спираючись на досвід продовольча та сільськогосподарська організації ООН, центру спільних досліджень, Європейського космічного агентства[60], та фізико-географічні чи інші характеристики окреслених територій, враховуючи розміри, фрагментованість територій, тощо, найбільш раціональним поділити територію на 5 класів, який включатиме в себе декілька типів флористичних угруповань, « відкрити водну поверхню» та «територію без рослинності».

Для класифікації було сформовано мультиспектральний космічний знімок, що охоплює три спектральні діапазони: В7 — середній інфрачервоний (2,08–2,35 мкм), В5 — ближній інфрачервоний (1,55–1,75 мкм) та В4 — видимий червоний (0,63–0,69 мкм). Для підвищення точності аналізу та дешифрування типів поверхні додатково залучалися інтерактивні картографічні дані платформи Bing Maps.

На початковому етапі були відібрані космічні знімки певних водно-

болотних угідь (ВБУ), зокрема верхів'я Київського водосховища, Сульської затоки Кременчуцького водосховища, а також верхніх і середніх ділянок Канівського та Кременчуцького водосховищ. Відбір здійснювався за однаковий сезонний період (з 06.06 до 17.06), коли рівень води стабільний і маса водної рослинності помірна, що сприяє отриманню репрезентативних спектральних даних.

Виходячи з показників спектральної яскравості різних типів відбивних поверхонь, а також зважаючи на високу фрагментованість території ВБУ, було виділено п'ять основних класів поверхні

Таблиця 4.1

Основні типи класифікованої поверхні та їх властивості

Назва класу	Код класу	Колір класу	Код кольору
Відкрита водна поверхня	1	Синій	#0000ff
Гідрофіти (всі групи вологолюбних рослин)	2	Бірюзовий	#01dfc0
Лучна рослинність	3	Світло-зелений	#19ee22
Лісова та чагарникова рослинність	4	Темно-зелений	#40a132
Поверхня без рослинного покриву	5	Золотий	#ead111

Варто зазначити, що гідрофіти (код класу 2) охоплюють усі групи вологолюбних та водних вищих рослин, зокрема гідрофіти, гідрофіти та гідатофіти. Ці рослини пристосовані до умов надмірної вологості або постійного перебування у воді, виконуючи важливу роль у водно-болотних екосистемах.

Поверхня без рослинного покриву (код класу 5) включає такі типи ділянок, як піщані коси, пляжі, відкритий ґрунт, що утворився внаслідок антропогенної діяльності, зокрема будівництва, розробки кар'єрів, а також дороги. Такі поверхні характеризуються низьким або нульовим індексом вегетації, що свідчить про відсутність або мінімальну кількість рослинності.

Для створення класифікаційної моделі було підготовлено векторний файл еталонних ділянок, що містив від 100 до 300 еталонів для кожного класу, за винятком класу поверхонь без рослинності, які виділялися особливою спектральною яскравістю. Після формування еталонних класів здійснено автоматичну класифікацію за допомогою плагіна Dzetsaka, що дозволило точно розподілити поверхню на обрані класи.

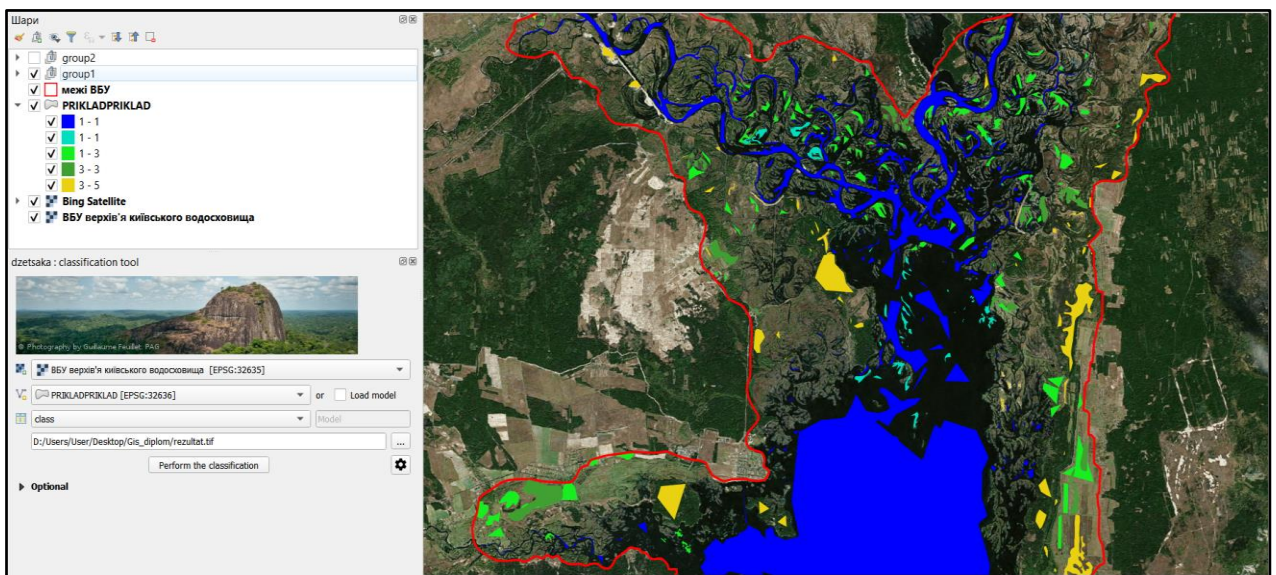


Рис. 4.14. Процес керованої класифікації ВБУ верхів'я Київського водосховища

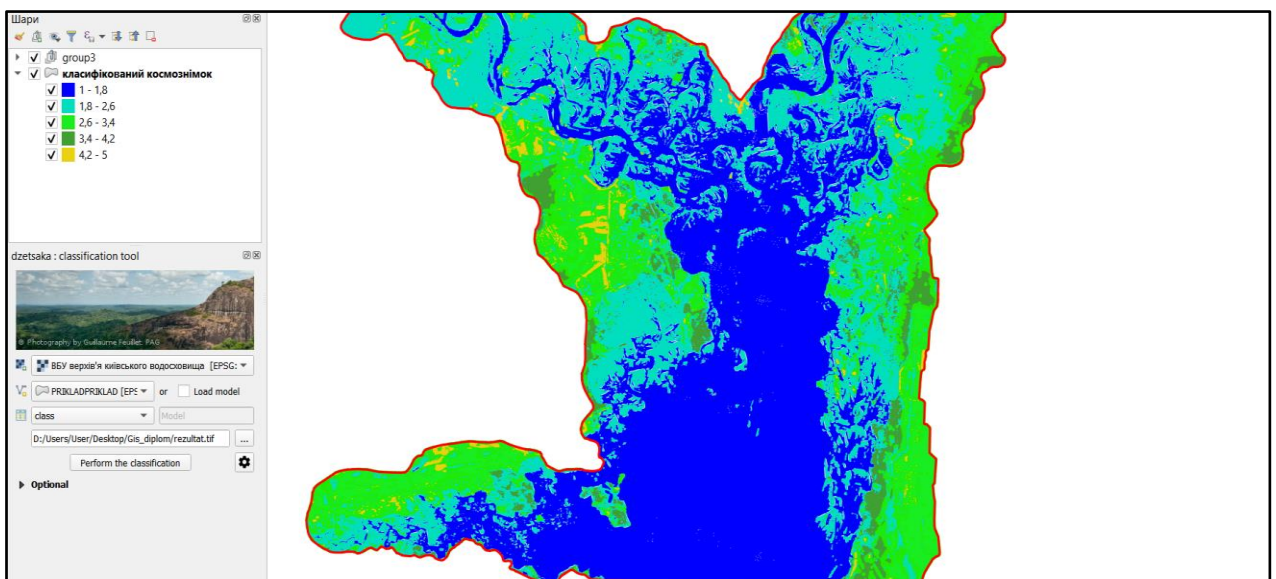


Рис. 4.15. Результат класифікації ВБУ верхів'я Київського водосховища

Для проведення подальшого аналізу растрове зображення було необхідно конвертувати у векторний формат, щоб забезпечити можливість точного обчислення площ кожного з класифікованих класів. В якості цільового формату для векторизації було обрано шейп-файл (.SHP), оскільки цей формат широко підтримується та зручний для обробки у геоінформаційних системах, зокрема в QGIS. Однак процес конвертації був ускладнений наявністю численних топологічних помилок, що унеможливило коректне створення векторних даних без попередньої обробки.

Для усунення топологічних помилок було застосовано інструмент Mapshaper[60], який дозволяє працювати з геоданими в командному рядку. Спочатку було обрано цільовий файл, після чого виконано команду `clean`, яка забезпечує виправлення топологічних помилок, таких як перекриття, розриви між сусідніми об'єктами та дублікати геометрій. Після успішного виправлення топології шейп-файл було завантажено в QGIS, де він пройшов фінальну перевірку на коректність та був остаточно перетворений у векторний формат. Це забезпечило можливість подальших геоінформаційних операцій, включаючи аналіз площ і візуалізацію результатів класифікації.

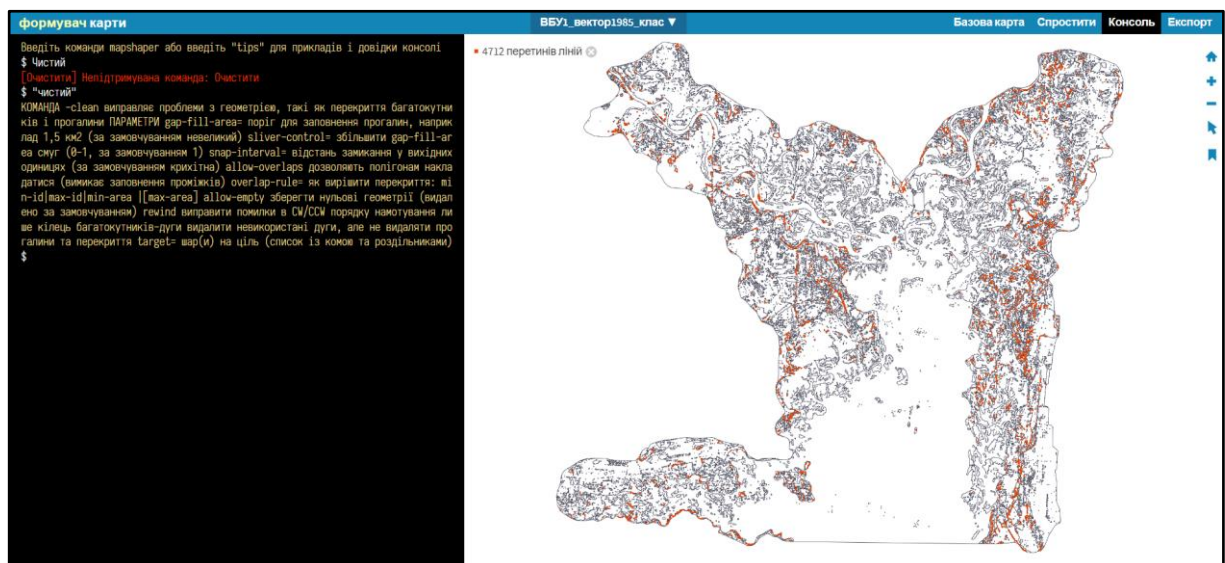


Рис. 4.16 Виправлення топологічних помилок в Mapshaper

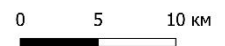
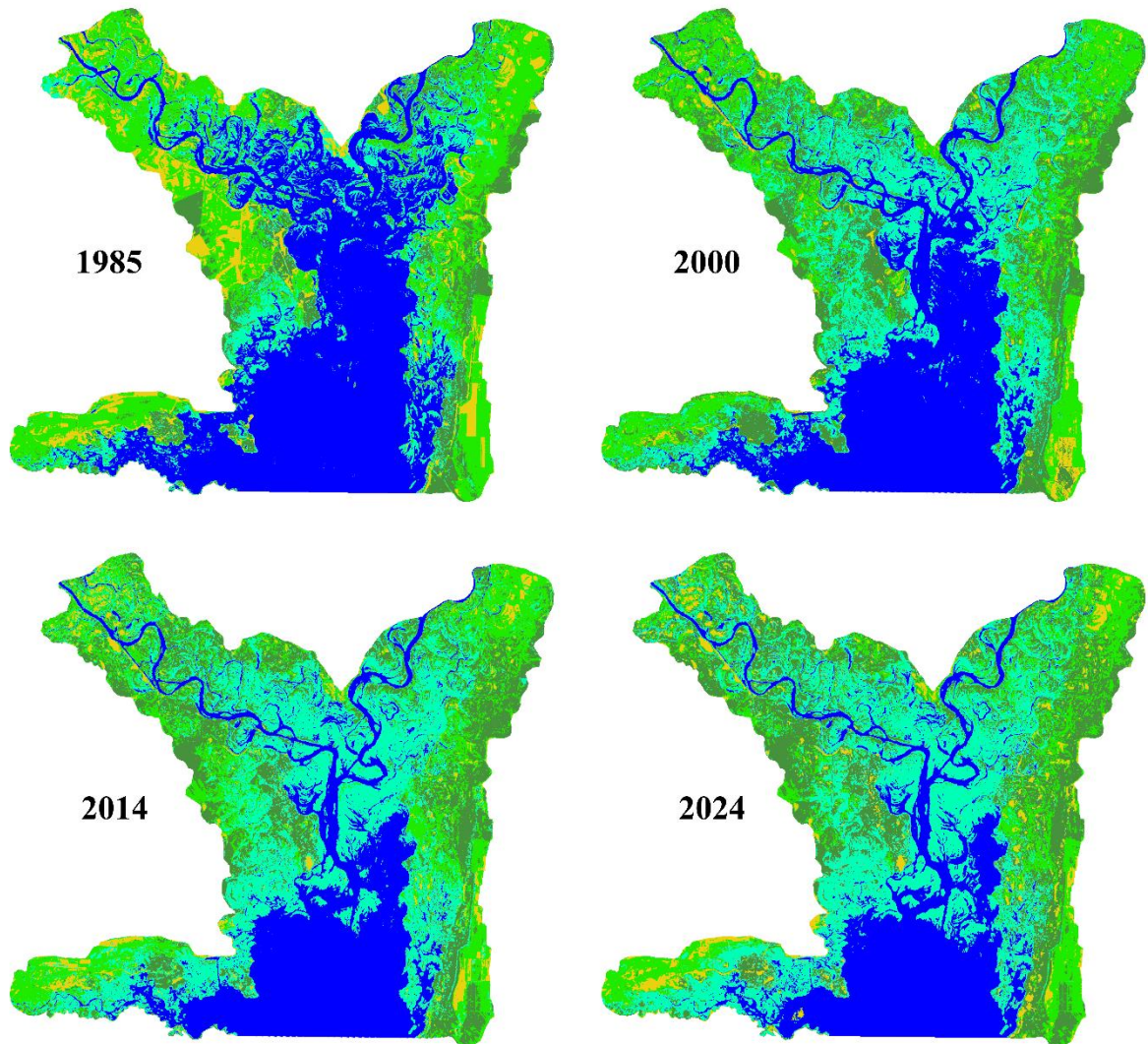
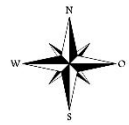
4.5. Оцінка стану та динаміки змін ВБУ

4.5.1 Оцінка динаміки змін ВБУ зміни водно-болотних угідь ділянки верхів'я Київського водосховища

На основі проведеної класифікації супутникових знімків динаміка змін водно-болотних угідь верхів'я Київського водосховища (рис. 4.17) демонструє суттєві зміни у структурі рослинного покриву, площі відкритої водної поверхні та територій, зайнятих гідрофітами, лучною, лісовою і чагарниковою рослинністю. Результати класифікації свідчать про зміну домінування окремих типів покриву та активізацію сукцесійних процесів, які можуть бути спричинені як природними, так і антропогенними факторами.

У 1985 році відкриті водні акваторії охоплювали найбільшу частку загальної площі – 26,752 га (44,4%). Протягом наступних десятиліть їхня площа зменшувалася, досягнувши у 2024 році лише 15,033 га (25%), що становить скорочення на 43,8%. В наслідок падіння рівня води контур водного дзеркала на півночі ВБУ змістилася вниз за течією, в наслідок чого дельти Дніпра та Прип'яті з'єдналися в одну. Такі зміни сприяли колонізації колишніх мілководь гідрофітами та гідатофітами, які у 2024 році займають близько 20,091 га (33,3%) у порівнянні з 10,658 га (17,7%) у 1985 році. Ріст їхніх площ на 88,6% є свідченням природних сукцесійних процесів, що активізувалися через обміління не глибоких ділянок водосховища.

Динаміка зміни водно-болотних угідь ділянки верхів'я Київського водосховища (результат керованої класифікації космознімків)



Умовні позначення

- 1-відкрита водна поверхня
- 2-гідрофіти
- 3-лучна рослинність
- 4-лісова та чагарникова рослинність
- 5-територія без рослинності

тип поверхні	площа га 1985р.	площа га 2000р.	площа га 2014р.	площа га 2024р.
1	26752	19852	16539	15033
2	10658	16721	19971	20091
3	15338	10915	10777	9091
4	7133	14701	14656	17111
5	4668	2362	2649	3221

Рис. 4.17 Динаміка зміни водно-болотних угідь ділянки верхів'я Київського водосховища. Результат керованої класифікації за космознімків 06.06.1985р,

10.06.2000р, 12.06.2024р, та 08.06.2024р.

Лучна рослинність має протилежну тенденцію: її площа зменшилася з 15,338 га (25,5%) у 1985 році до 9,091 га (15,1%) у 2024 році, що становить скорочення на 40,7%. Цей процес, імовірно, обумовлений конкуренцією з гідрофітами та поступовою трансформацією лучних угідь у деревно-чагарникові біотопи. Лісова та чагарникова рослинність, у свою чергу, демонструє найбільший приріст: її площа зросла з 7,133 га (11,8%) у 1985 році до 17,111 га (28,4%) у 2024 році, що становить приріст на 139,9%. Така динаміка відображає розширення лісових угідь на територіях, що раніше були заболоченими або мілководними, в наслідок зменшення рівня води, ймовірно знизився й рівень ґрунтових вод на прибережних ділянках що створило сприятливі умови для формування дерево-чагарникових угруповань.

Ділянкою, яка не підлягає під загальні тенденції стала місцевість на Заході ВБУ. На основі аналізу знімків Google Satellite можна побачити, що на досліджуваній території існує система меліоративних каналів, які видно як прямі лінії, характерні для штучно створених водостоків, які в свою чергу не можливо класифікувати на космознімку через їх відносно невелику ширину. Наявність такої системи каналів може свідчити про меліоративну діяльність, метою якої, ймовірно, було осушення прибережної території для сільськогосподарських або інших потреб.

Проте, за сучасним виглядом рослинного покриву (переважання гідрофітів), висунуто гіпотезу, що ефективність цієї системи значно знизилася, імовірно через замулення або припинення технічного обслуговування, тощо. Це, у свою чергу, могло призвести до підвищення рівня ґрунтових вод і трансформації території в зону, сприятливу для розвитку вологолюбних флористичних угруповань.

Зміни охопили також території без рослинного покриву, площі яких зазнали коливань, хоча вони не демонструють чіткої тенденції бо є швидкозмінними. Їхні варіації можуть змінюватися з року в рік залежно від

кількості об'єктів, які належать до цього класу, а також від факторів їхнього утворення. До цієї категорії належать як відносно постійні (стабільні) об'єкти, так і тимчасові.

До стабільних об'єктів цього класу можна віднести піщані коси, дороги (за умови мінімальної кількості деревної рослинності на узбіччях; в іншому випадку спектральна яскравість пікселя скоріше належатиме до класу лісової або чагарникової рослинності, зважаючи на невелику ширину об'єкта та роздільну здатність космічного знімка, яка становить 30 метрів і переважає ширину дороги), будівлі та інші нерухомі об'єкти, які характеризуються нульовим вегетаційним індексом.

Непостійні об'єкти, що належать до цього класу, включають, наприклад, місця згарищ після пожеж або свіжо оброблені поля з відкритим ґрунтом. Ці об'єкти можуть змінювати свої характеристики залежно від природних чи антропогенних процесів, таких як сезонні роботи, пожежі чи інші впливи, що призводять до тимчасового оголення ґрунту або знищення рослинності.

У 1985 році площа території цього класу становила 4,668 га (7,8%), зменшилися до 2,362 га (3,9%) у 2000 році, але до 2024 року зросли до 3,221 га (5,3%). Такі коливання, ймовірно, зумовлені як сезонними змінами, так і локальними антропогенними впливами, такими як господарська діяльність або ерозійні процеси.

Загалом класифікації свідчать, що головними механізмами змін у структурі покривів ВБУ верхів'я Київського водосховища є тенденція до поступового зниження об'єму водних мас, а також сукцесійні процеси, які визначають розвиток рослинного покриву. Зокрема, зниження водного рівня призводить до трансформації водно-болотних угідь, де поступово формуються більш стабільні екосистеми, адаптовані до нових умов. Такі процеси також можуть бути обумовлені кліматичними змінами, які впливають на гідрологічний режим водосховища та суміжних екосистем.

4.5.2 Оцінка динаміки змін ВБУ верхньої та середньої ділянки Канівського водосховища

Динаміка змін водно-болотних угідь верхньої та середньої частини Канівського водосховища (рис. 4.18.) за період 1985–2024 років відображає поступову трансформацію екосистем під впливом природних та антропогенних факторів. Результати класифікації показують значні коливання площ для кожного типу покриття, включаючи перехідні зміни між проміжними етапами.

У 1985 році відкриті водні акваторії займали 28,714 га, що становило найбільшу частку загальної площі – 47,9%. Однак, їхня площа поступово зменшувалася до 25,947 га (43,3%) у 2000 році, 24,722 га (41,3%) у 2014 році та 23,774 га (39,7%) у 2024 році. Загальне скорочення на 17,2% за весь період свідчить про тривалий та поступовий процес обміління водосховища, що, ймовірно, було спричинено змінами гідрологічного режиму водосховища, кліматичними коливаннями, тощо.

Площа вологолюбних флористичних угруповань мали іншу динаміку. У 1985 році вони охоплювали 11,995 га (20%), до 2000 року скоротилися до 11,504 га (19%), така зміна не може свідчити про деякі зміни окремо, через незначне зменшення площ даного класу, тому більш інформативними є дані які демонструють зміни площ інших класів. 2014 році площа вологолюбних рослин зроста до 13,585 га (22,7%) що може вказувати на заселення гідрофітами та гідратофітами акваторій які стали мілководними, в наслідок зменшення площі водного дзеркала і надалі вона поступово зменшилася до 12,512 га (20,9%) у 2024 році, що вказує на стабілізацію умов, та заміщення гідрофітних угруповань лучними або чагарниками.

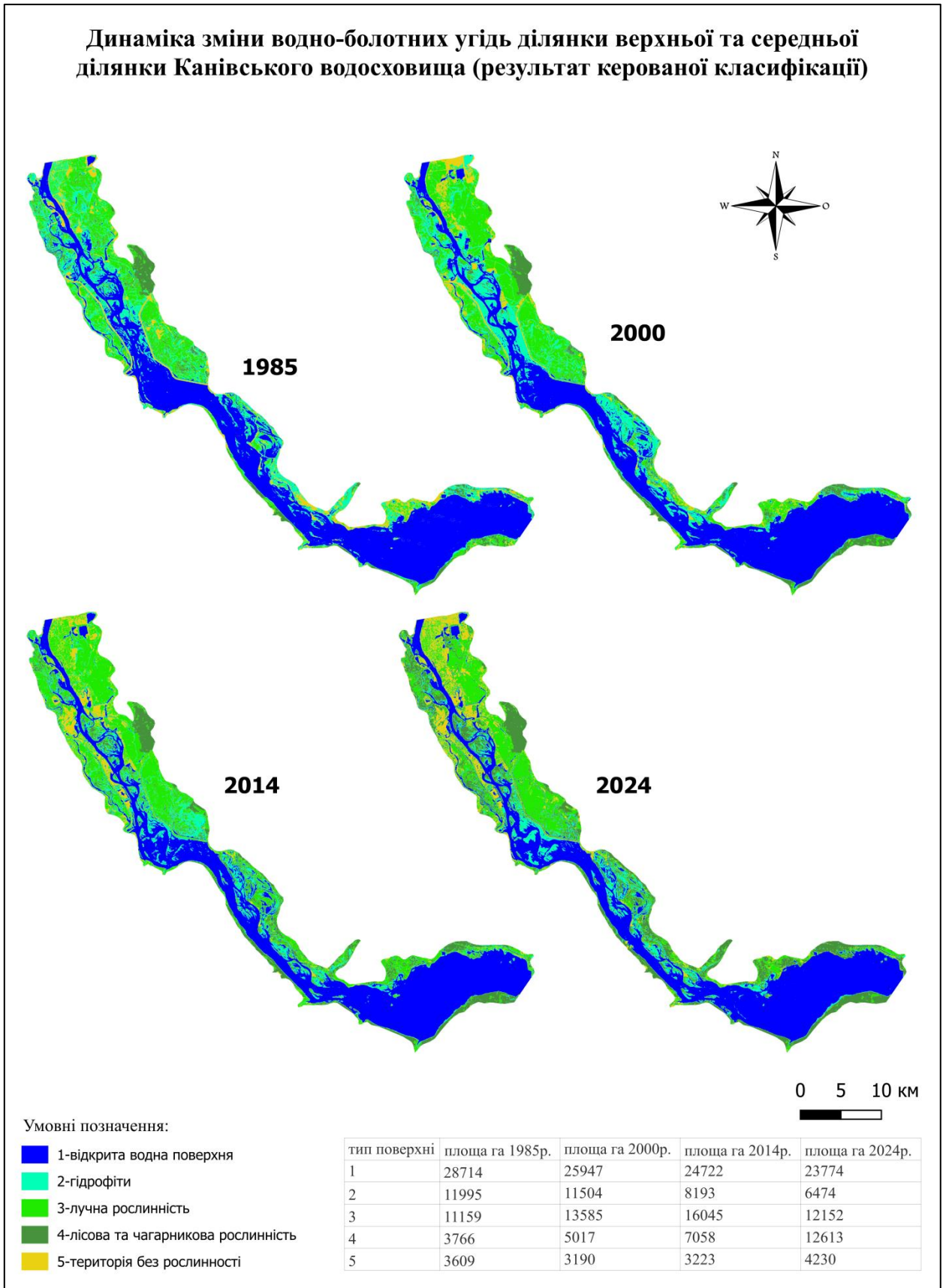


Рис. 4.18. Динаміка зміни водно-болотних угідь ділянки верхньої та середн. ділянки Канівського водосховища. Результат керованої класифікації за космознімків 06.06.1985р, 07.06.2000р, 06.06.2000р. та 09.06.2024р.

Лучна рослинність демонструвала найбільш нестабільні зміни. У 1985 році її площа складала 11,159 га (18,6%), але до 2000 року вона збільшилася до 13,585 га (22,7%), і досягла максимуму в 16,045 га (26,8%) у 2014 році. Це свідчить про те, що при зниженні рівня води лучні екосистеми мали сприятливі умови для розширення. До 2024 року їхня площа скоротилася до 12,132 га (20,3%), що, ймовірно, пов'язано з конкуренцією з іншими типами рослинності, зокрема чагарниково-лісовими угрупованнями, яким потрібно найбільше часу для формування в нових ділянках.

Лісова та чагарникова рослинність демонструвала стабільне зростання протягом усього досліджуваного періоду. У 1985 році вона охоплювала 3,766 га (6,3%), у 2000 році – 5,017 га (8,4%), у 2014 році – 7,058 га (11,8%), і до 2024 року збільшилася до 12,613 га (21%). Така динаміка свідчить про поступове відновлення лісових екосистем під час того як ґрунти даної території стали субгідроморфними чи мезоморфними.

Території без рослинності залишалися відносно стабільними та не відіграє ролі типу території за яка може демонструвати ті чи інші тенденційні зміни, хоча їхня частка коливалася в межах 3,6-4,2%. У 1985 році вони займали 3,609 га (6%), зменшилися до 3,190 га (5,3%) у 2000 році – 3,223 га (5,4%) у 2014 році і зросли до 4,230 га (7,1%) у 2024 році. Такі коливання, за аналогією із територією ВБУ Київського водосховища, можуть бути зумовлені як природними (ерозія, посухи), так і антропогенними факторами (господарська діяльність, урбанізація).

Загалом результати класифікації на територію ВБУ Канівського водосховища вказують на комплексну взаємодію між природними і антропогенними факторами, що впливають на динаміку водно-болотних угідь Канівського водосховища. Основними тенденціями є поступове скорочення площі відкритої водної поверхні, розширення гідрофітів та лісової рослинності, а також коливання лучних екосистем і територій без рослинного покриву. Ці процеси вказують на активні сукцесійні зміни, що формують новий типовий екосистемний баланс для даної території.

4.5.3 Оцінка динаміки змін ВБУ верхів'я Кременчуцького водосховища

Протягом досліджуваного періоду спостерігається виражена динаміка змін різних типів покриття території. Зокрема, площа відкритої водної поверхні, як і на попередніх ВБУ, поступово зменшувалась. У 1989 році площа відкритого водного дзеркала охоплювала 15 314 га, тоді як у 2024 році скоротилася до 12 136 га, що становить зменшення приблизно на 20,7%.

Клас «Гідрофіти», які демонструють вологолюбні флористичні угруповання, демонструють поступове збільшення своєї площі. У 1989 році вони займали 6 506 га, а до 2024 року їхня площа збільшилася до 10 495 га. Такий ріст вказує на розширення зон заболочення, через збільшення мілководних ділянок, що дало змогу розвиватись типовим гідрофітним та гідратофітним флористичним угрупованням.

Лучна рослинність, на даній території показує тенденцію до зменшення. У 1989 році її площа становила 4 686 га, тоді як до 2024 року вона скоротилася до 3 890 га, що відповідає зменшенню на 17%. Це може бути пов'язано з трансформацією лук у гідрофітні або деревно-чагарникові угруповання через зміни режиму зволоження.

Лісова та чагарникова рослинність зазнала певних не значних коливань. Її площа у 1989 році становила 7 538 га, тоді як у 2024 році вона становить приблизно 7 946 га. Така зміна не є репрезентативною для встановлення будь яких тенденційних змін через незначні коливання даного класу.

Території без рослинного покриву, які включають піщані ділянки, відкритий ґрунт і антропогенні об'єкти, продемонстрували скорочення площі між 1989р (займали 2 236 га.) та 2024р.(займали 1 829 га), хоча обрахунки площ за проміжні роки вказують на значну волатильність площ цих територій, яка залежить більшою мірою від антропогенних факторів, та не має тенденційних змін.

Динаміка зміни водно-болотних верхів'я Кременчуцького водосховища водосховища (результат керованої класифікації за космоснімків)

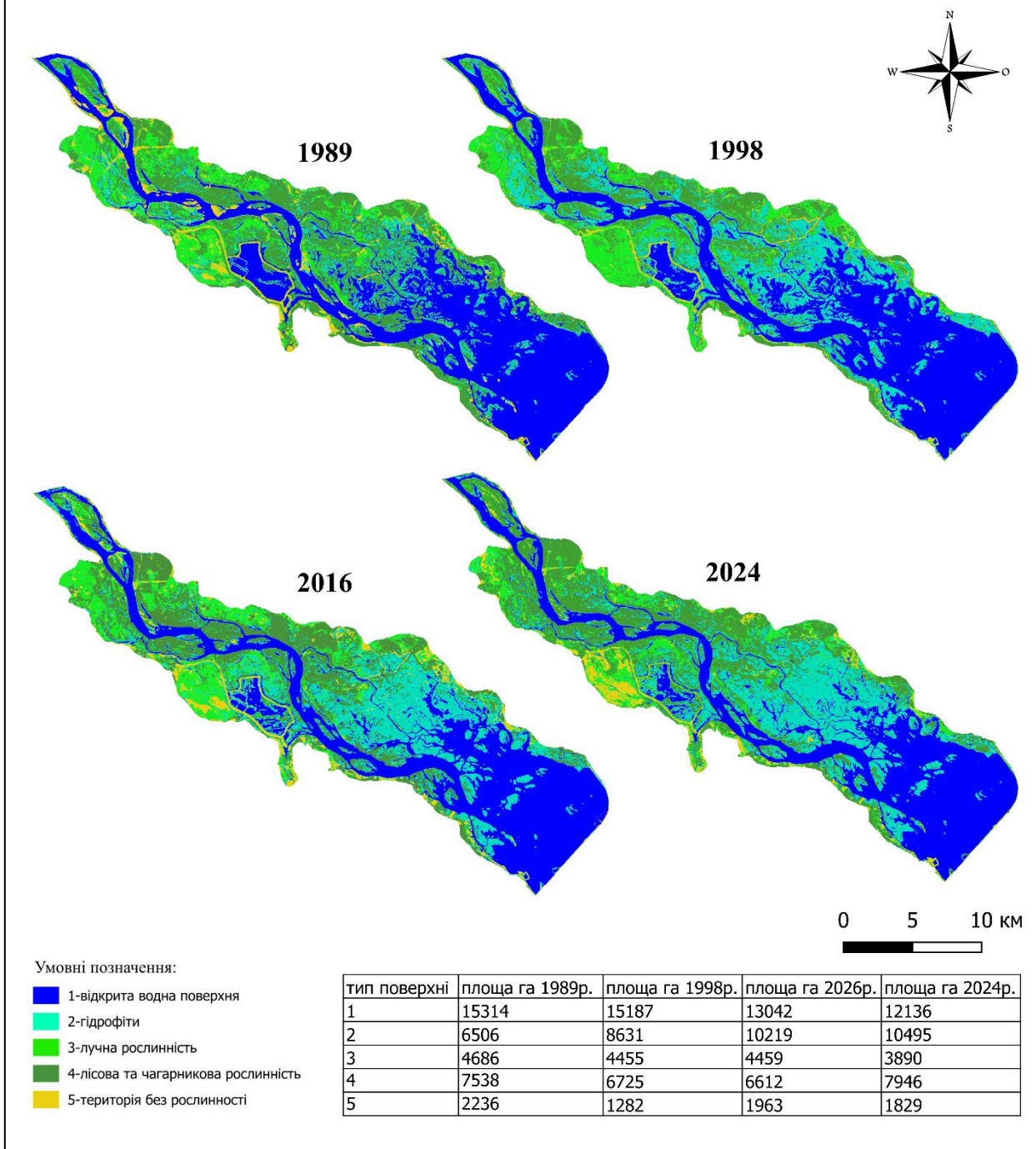


Рис. 4.19 Динаміка зміни водно-болотних угідь верхів'я Кременчуцького водосховища. Результат керованої класифікації за космоснімків за 18.06.1989р, 03.06.1998р, 06.06.2016р. та 20.06.2024 р.

Підсумок результатів класифікацій. За результатами аналізу динаміки водно-болотних угідь у верхів'ї Київського, Канівського та Кременчуцького водосховищ за період 1985–2024 років можна виявити істотні зміни в структурі покривів під впливом природних і антропогенних факторів. Основні тенденції на всіх ВБУ включають:

1. *Зменшення площі відкритих водних поверхонь.* На всіх трьох водосховищах спостерігалось скорочення площі водного дзеркала, спричинене обмілінням водойм. Це стало наслідком зміни гідрологічного режиму та кліматичних змін.

2. *Ріст площ гідрофітів, гідрофітів та гідратофітів.* Заболочення колишніх мілководь сприяло значному розширенню зон, зайнятих вологолюбною рослинністю.

3. *Збільшення лісових і чагарникових площ.* Ці угруповання поступово колонізували території, що раніше належали до лучних чи відкритих водойм, через пониження рівня ґрунтових вод.

4. *Скорочення лучних угідь.* Конкуренція з гідрофітами і перехід до лісових чи чагарникових біотопів стали ключовими причинами зменшення площ луків.

5. *Нестабільність територій без рослинного покриву.* Їхні площі демонструють значну варіативність, обумовлену сезонними та антропогенними чинниками.

Всі зазначені зміни вказують на активні сукцесійні процеси, що перебудовують екосистеми водно-болотних угідь. Це може бути результатом як природних умов, так і людської діяльності, включаючи меліорацію, зміну рівнів води в водосховищах і кліматичні зміни. Формується новий екологічний баланс, адаптований до сучасних умов.

4.5.4. Моніторинг стану евтрофікації водойм за вегетаційними індексами

Окрім динаміки змін водно-болотних угідь (ВБУ), була здійснена оцінка інтенсивності процесу евтрофікації, що становить одну з найактуальніших екологічних проблем для акваторії Дніпра в літній період.

Евтрофікація — це процес збагачення водойм біогенними сполуками, що супроводжується зниженням екологічної продуктивності. Він характеризується інтенсивним розвитком одноклітинних водоростей, дефіцитом кисню у воді, загибеллю гідробіонтів і суттєвим порушенням екосистемної рівноваги. Внаслідок евтрофікації значна частина біоти водойми може загинути, а екосистема зазнати катастрофічних змін. Найбільш вагомими факторами, які впливають на процес евтрофікації, є температура води та надходження хімічних речовин, зокрема біогенних. Цей процес найбільш характерний для водойм із застійною водою або для водотоків із повільною течією [76].

Навесні, з початком вегетаційного періоду, підвищується температура води, в наслідок чого одноклітинні водорості активно розвиваються, піднімаючись до поверхні води. У процесі життєдіяльності вони поглинають шкідливі домішки та сприяють аерації води. Однак із закінченням вегетаційного періоду водорості відмирають, а їх розкладання супроводжується утворенням токсичних речовин. Це додатково сприяє погіршенню якості води та екологічного стану водойми [76].

Для аналізу стану акваторії були використані дані супутникових знімків Sentinel-2, за допомогою яких визначався вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормалізований різницевий індекс рослинності, який є кількісним показником фотосинтетично активної біомаси. NDVI дозволяє кількісно оцінити динаміку зеленої біомаси, оскільки рослини в різні фази вегетації відбивають хвилі певної довжини по-різному.

Для аналізу конкретних територій з використанням NDVI можливо застосовувати як стандартні спектральні комбінації при обробці супутникових знімків, так і виконувати їх розрахунки самостійно. У рамках цього дослідження для демонстрації різних способів розрахунку NDVI було використано спеціалізоване програмне забезпечення SNAP (рис. 4.20–4.21) для обробки супутникових даних Sentinel та відкритої геоінформаційної системи QGIS (рис. 4.22 – 4.23).

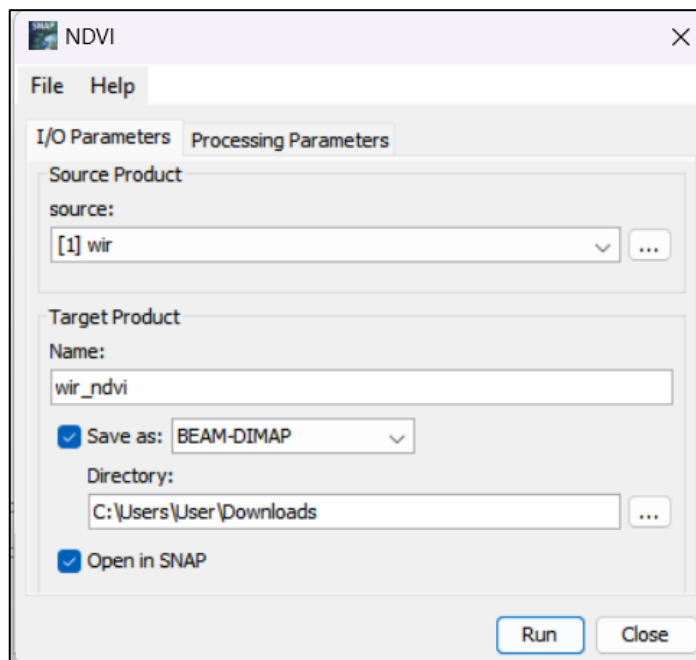


Рис. 4.20 Вікно обчислення просторового індексу в програмному забезпеченні SNAP

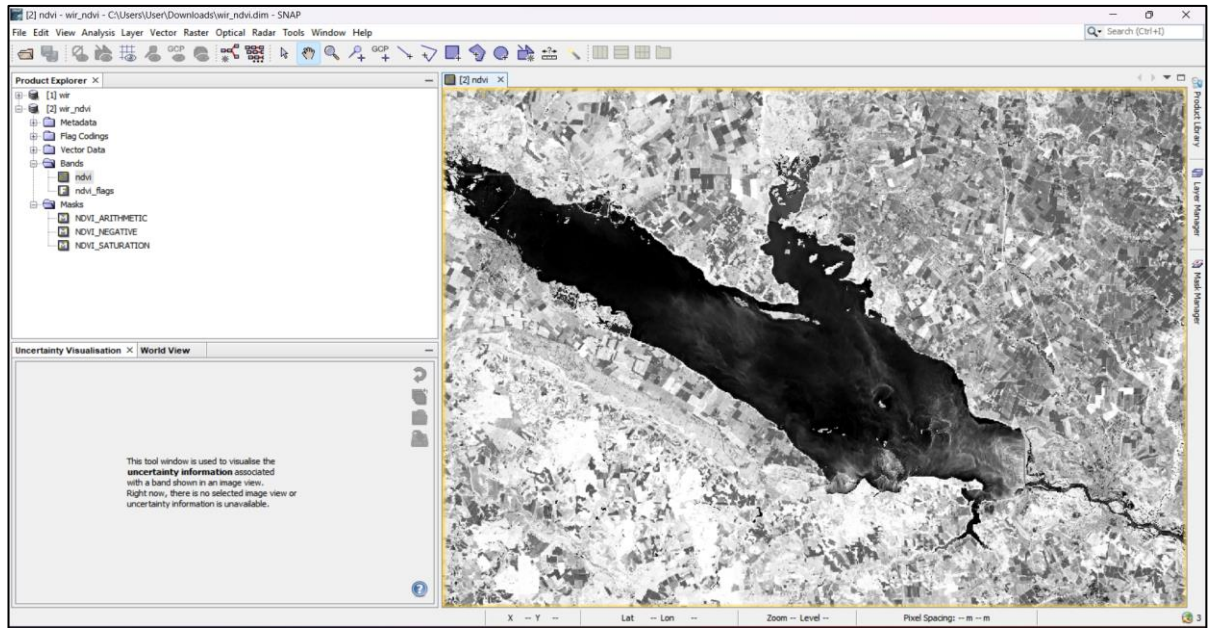


Рис. 4.21. Результат обчислення просторового індексу в програмному забезпеченні SNAP

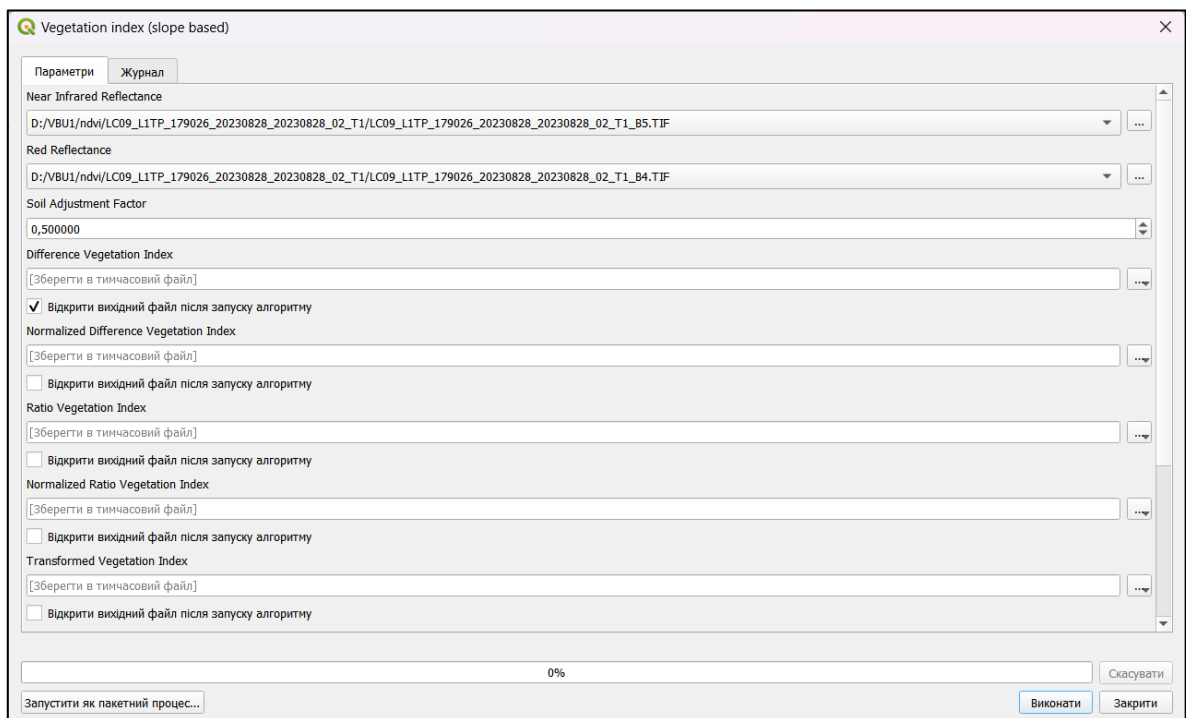


Рис. 4.22 Вікно обчислення просторового індексу в програмному забезпеченні QGIS

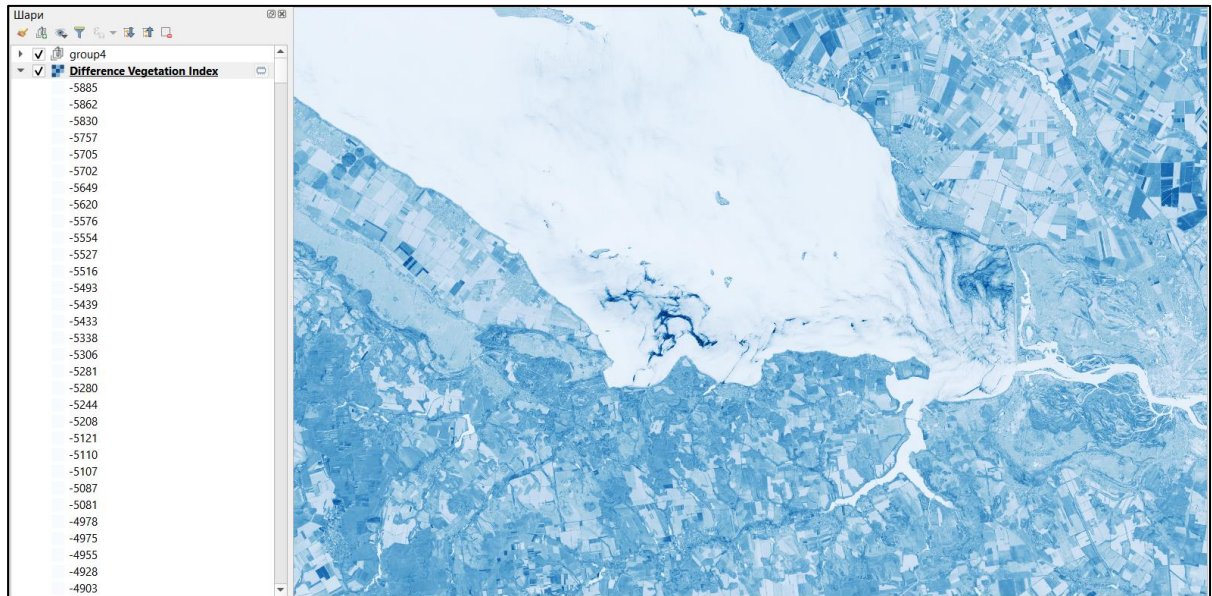


Рис. 4.23 Результат обчислення просторового індексу в програмному забезпеченні QGIS

На попередніх етапах дослідження було розроблено методику виділення меж ВБУ. Дана методика використовувалася і для цього аналізу, хоча й слугувала не точними, а приблизними рамками меж досліджень, адже ВБУ є комплексом як гідрологічних так і наземних земних покривів, а оцінка евтрофікації проводиться тільки для водної поверхні. Процедура виділення ВБУ необхідна для розуміння акваторій які стануть об'єктом дослідження.

Для оцінки евтрофікації було обрано три ділянки з різною морфологією та гідрологічними характеристиками: Сульська затока Кременчуцького водосховища (рис.4.24), Цибульська затока Кременчуцького водосховища (рис.4.25), ВБУ верхів'я Кам'янського водосховища (рис. 4.26).

1. Сульська затока Кременчуцького водосховища — утворилася внаслідок затоплення дельти річки Сула після спорудження водосховища. У цій зоні постійно відбувається змішування водних мас через приток річки Сула.



Рис. 4.24 Мультиспектральний космознімок Sentinel-2 L2A з обрахованим індексом NDVI для території ВБУ Сульської затоки Кременчуцького водосховища. Шкала від -1 до 1 показує рівень біомас або активність фотосинтезу: значення ближче до +1 свідчать про високу концентрацію водоростей і сильну евтрофікацію, 0 або нижче 0 можуть вказувати на відкриту воду без значної біологічної активності.

2. Цибульська затока Кременчуцького водосховища — типова акваторія великих водосховищ у середній частині Дніпра. Значна площа затоки охоплює частину Кам'янського водосховища, яке має стабільний гідрологічний режим. Через невеликі розміри річка Цибульник майже не впливає на стан затоки, що робить її ідеальною для аналізу евтрофікації у природних умовах.



Рис. 4.25 Мультиспектральний космознімок Sentinel-2 L2A з обрахованим індексом NDVI для території ВБУ Цибульської затоки та нижньої частини Кременчуцького водосховища. Шкала від -1 до 1 показує рівень біомас або активність фотосинтезу: значення ближче до +1 свідчать про високу концентрацію водоростей і сильну евтрофікацію, 0 або нижче 0 можуть вказувати на відкриту воду без значної біологічної активності.

3. Верхів'я Кам'янського водосховища — представник ВБУ середньої течії Дніпра, де частково зберігається русловий гідрологічний режим водосховища.

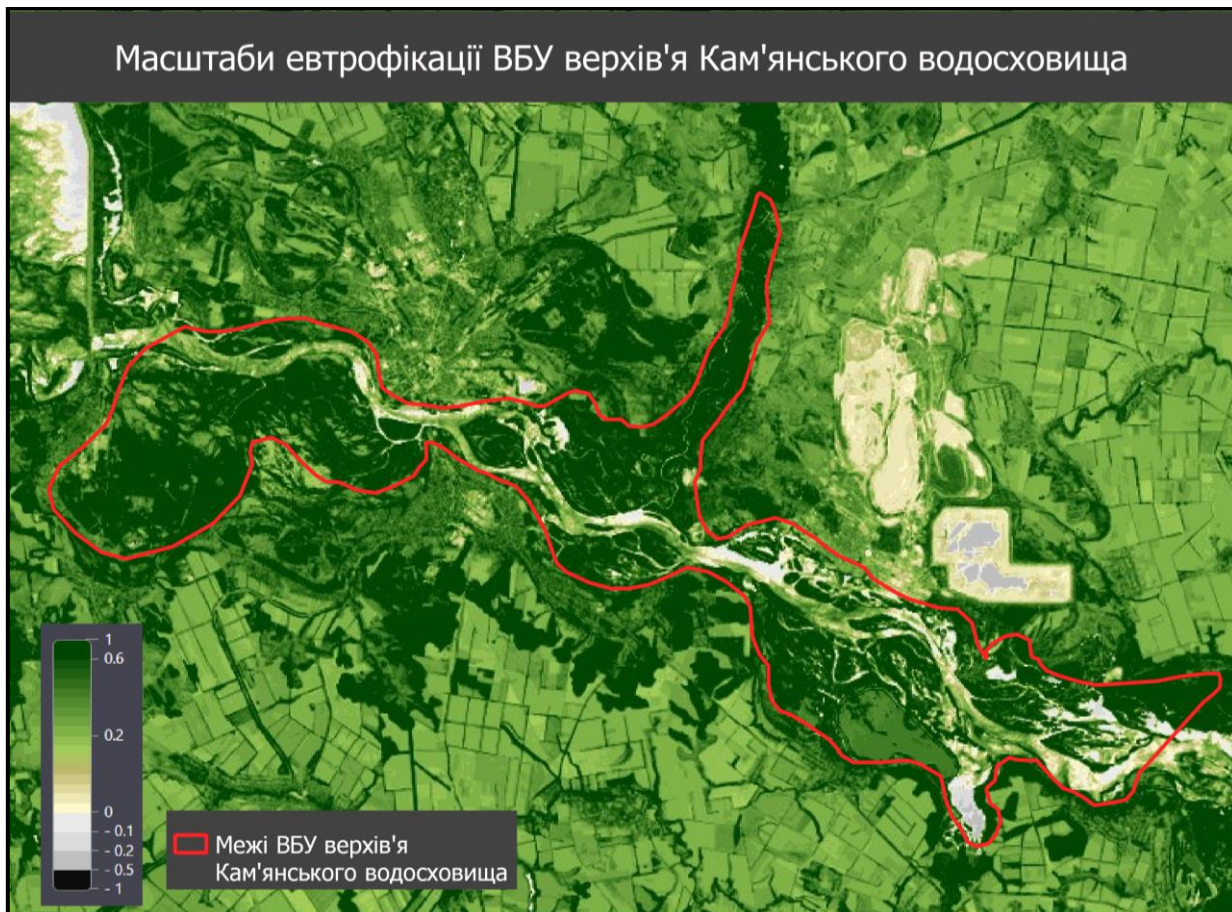


Рис. 4.26 Мультиспектральний космознімок Sentinel-2 L2A з обрахованим індексом NDVI для території ВБУ верхів'я Кам'янського водосховища.

Шкала від -1 до 1 показує рівень біомас або активність фотосинтезу: значення ближче до +1 свідчать про високу концентрацію водоростей і сильну евтрофікацію, 0 або нижче 0 можуть вказувати на відкриту воду без значної біологічної активності.

Для оцінки евтрофікації акваторій використання підходу, який передбачає опрацювання максимальної кількості доступних супутникових знімків із подальшим ручним розрахунком NDVI індексу і визначенням усереднених значень для досліджуваних територій є досить ефективним.

Такий підхід дозволяє відбирати космознімки в ручному режимі, це є важливим фактором, оскільки хмарність може суттєво ускладнювати обчислення індексів. Відбиття світлових хвиль від хмар часто створює артефакти у спектральних зображеннях, що призводить до отримання некоректних результатів. Завдяки ручному обрахунку NDVI можна забезпечити більш детальну оцінку динаміки процесів евтрофікації, однак реалізація такого методу потребує значних людських ресурсів (для відбору та обробки відповідних знімків може знадобитися кілька місяців роботи), що значно ускладнює застосування цього підходу для великої кількості водних об'єктів або при регулярному моніторингу.

Через вказані обмеження у цій роботі було прийнято рішення продемонструвати лише процес розрахунку індексів вручну, щоб продемонструвати потенціал методики, а для оцінки масштабів і динаміки процесів евтрофікації використовувати автоматизований підхід у програмному забезпеченні EO Browser [77], що дозволило значно зменшити часові витрати й автоматизувати аналіз значного обсягу супутникових даних. Такий підхід забезпечує оперативність та системність, хоча й може поступатися ручному методу у врахуванні локальних факторів, зокрема хмарності, яка впливає на результат даних.

На противагу можна зазначити, що використання методу обчислення NDVI є цілком прийнятним для дослідження водних поверхонь, оскільки в таких випадках присутність хмар у сенсорних даних зазвичай призводить до отримання негативних значень індексу, які характерні для води. Це пояснюється високим рівнем відображення в червоній та ближньо-інфрачервоній частині спектра, що знижує значення NDVI, навіть якщо під хмарами є рослинність. Як правило, значення NDVI в діапазоні від -1 до 0 вказують на наявність водних поверхонь. При наявності хмар, через підвищене відображення світла від хмарних покривів, індекс може мати ще нижчі значення, що впливає на точність вимірювань [78;79;80].

Для оцінки евтрофікації основними для нашого дослідження є космоснімки з позитивними значеннями NDVI, оскільки такі знімки є більш релевантними індикаторами рівня біомаси та евтрофікаційних процесів у водних екосистемах. Тому, навіть якщо хмарність впливає на результат за допомогою стандартних інструментів EO Browser, цей вплив зводиться до значень індексу в межах від -1 до 0 [78;79;]. Під час аналізу таких значень можна знехтувати, оскільки вони не є суттєвими для оцінки масштабу евтрофікації, а результат з позитивними значеннями NDVI є більш інформативним для цього завдання.

Основною з переваг EO Browser є можливість працювати з великою кількістю знімків, формувати їх добірки для заданої території та досліджувати динаміку змін параметрів у визначені часові проміжки. Водночас у середовищі EO Browser відсутній інтегрований функціонал для завантаження попередньо підготовлених векторних файлів (наприклад, масок водних об'єктів, які можна було б підготувати в інших геоінформаційних системах), на основі яких можна було б обчислювати середні значення індексів для порівняння між різними територіями чи часовими періодами. Натомість в EO Browser доступний інструмент для створення геометричних примітивів (рис. 4.25), у межах яких автоматично розраховуються середні значення обраного індексу

Попри відсутність точного інструменту для імпорту векторних меж, цей недолік не є критичним для аналізу динаміки біомаси у водоймах. Біомаса, яка знаходиться у воді, характеризується високою динамічністю та змінює своє розташування у просторі через вплив течій, вітру та інших природних факторів. Таким чином, навіть із використанням приблизних меж досліджуваної території або навіть відносно невеликих ділянок які розташовані в межах ВБУ результати обчислень залишаються валідними, оскільки вони відображають загальні закономірності змін у водних екосистемах.

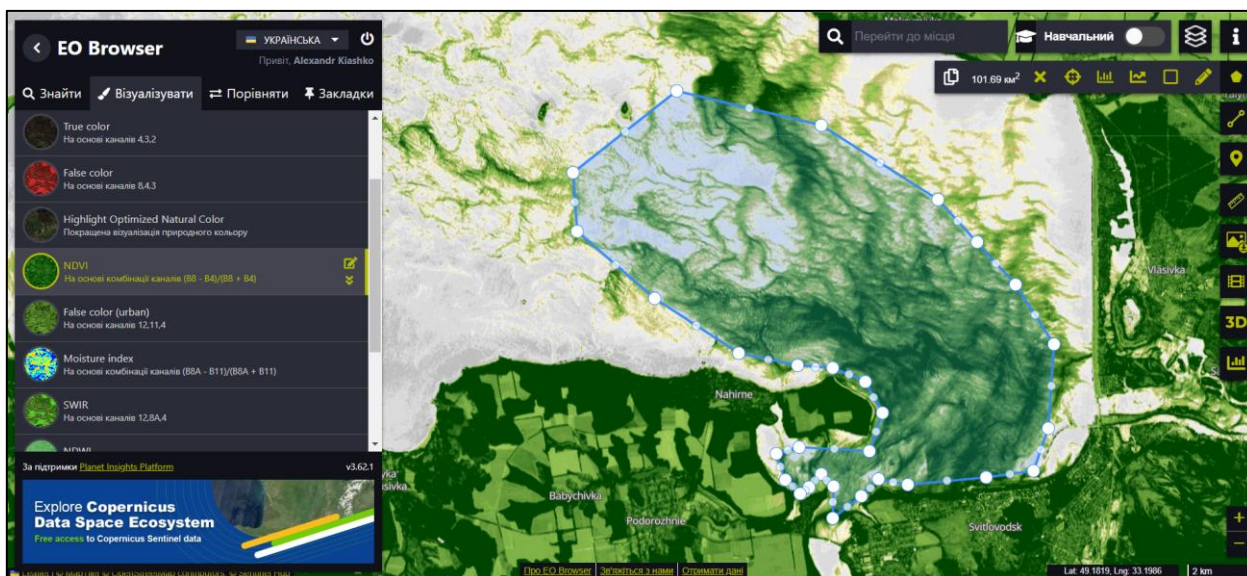


Рис. 4.25 Інтерфейс EO Browser під час аналізу території із використанням індексу NDVI: створення геометричного примітиву для розрахунку середніх значень індексу в межах визначеної акваторії

Результатами роботи в у середовищі EO Browser стали три графіки за п'ятирічний період які відображають масштаби та динаміку евтрофікаційних процесів у на акваторіях обраних та виокремлених ВБУ.

Індекс NDVI, на території водно-болотних угідь *Цибульської затоки* та нижньої частини Кременчуцького водосховища (рис. 4.26) варіюється в діапазоні від -1 до 1. Вищі значення, наближені до +1, свідчать про процеси інтенсивного фотосинтезу, що свідчить про значні процеси евтрофікації. Натомість значення, близькі до 0 або нижчі, відображають відкриту воду без значної біологічної активності.

Протягом аналізованого періоду відзначається сезонна циклічність у середніх змінах NDVI. Літні місяці, особливо з червня по серпень, демонструють найбільші пікові значення індексу, що пов'язано з інтенсивним розвитком евтрофікації під впливом сприятливих кліматичних умов, таких як високі температури і велика кількість сонячного світла. У цей час фотосинтез досягає максимуму, а концентрація біомаси у воді різко зростає, і такі показники повторюються з року в рік. Зимовий період, навпаки, характеризується зниженням індексу до мінімальних значень, що свідчить про зупинку активних біологічних в зв'язку із закінченням

вегетаційного періоду.

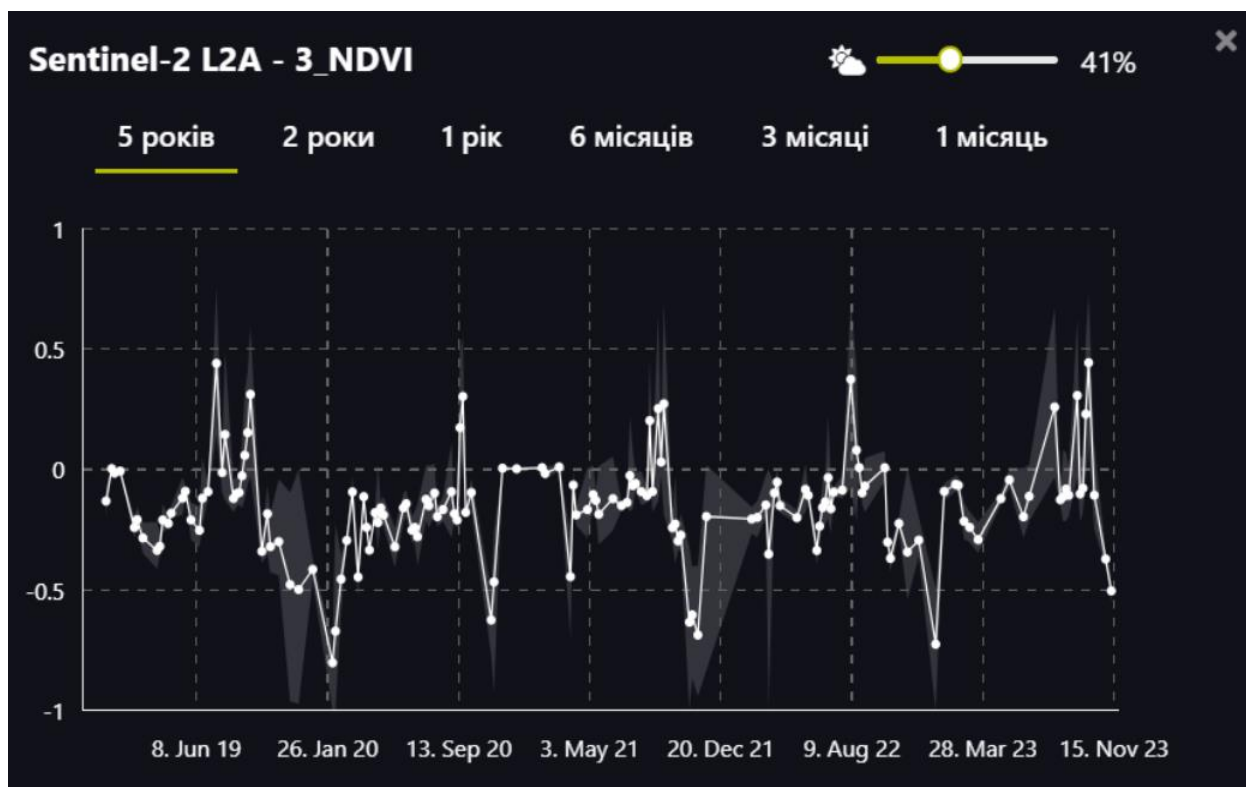


Рис. 4.26 Графік відображає динаміку індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) протягом п'яти років на території водно-болотних угідь Цибульської затоки та нижньої частини Кременчуцького водосховища.

У кожному з п'яти років чітко простежуються пікові значення NDVI. У 2019 році максимум індексу спостерігався у червні, досягаючи приблизно 0,6, що вказує на значний розвиток водоростей і активну біомасу в цей період. У 2020 році пік був менш вираженим і припадав на липень, досягаючи близько 0,5, що, ймовірно, пов'язано зі змінами погодних умов чи гідрологічного режиму. У 2021 році NDVI досяг свого максимуму в червні, знову наблизившись до 0,6, що свідчить про повернення до сприятливих умов для евтрофікаційних процесів. 2022 рік відзначався найвищими значеннями індексу серед усіх років, з піком понад 0,7 у серпні, що, може, свідчити про вплив додаткових антропогенних факторів, наприклад посилене нагромадження поживних речовин у водоймі. У 2023 році максимальне значення було зафіксовано у липні і сягнуло 0,65, що свідчить про стабільно високий рівень евтрофікації в цій зоні.

Важливо зазначити, що у кількох випадках спостерігалися аномальні сплески NDVI, які можуть бути не пов'язані з сезонними змінами. Наприклад, у 2022 році були зафіксовані значення, що значно перевищують середній літній рівень. Це може бути спричинено короткостроковими екологічними факторами, такими як накопичення біогенних сполук чи активних водоростей внаслідок течії, оскільки ця акваторія є найнижчою (за течією) всього Кременчуцького водосховища.

Індекс NDVI, розрахований для території *Сульської затоки* (рис. 4.27), також демонструє значні коливання, які відображають біологічну активність та стан водно-болотних угідь у цій зоні. Протягом п'ятирічного періоду спостерігається виражена сезонна циклічність змін NDVI. Період з червня по серпень, демонструє максимальні значення, що пов'язано з інтенсивним розвитком фотосинтетичної. У зимовий період NDVI суттєво знижується, що відповідає завершенню вегетаційного сезону та зменшенню біологічної активності.

Пікові значення NDVI у Сульській затоці, дещо менші в порівнянні з ВБУ Цибульської затоки та нижньої частини Кременчуцького водосховища, що можна пояснити припливом свіжої води, яку приносить річка Сула. Її води не є зарегульованими, що забезпечує природну циркуляцію, знижує ризик надмірного накопичення біогенних речовин і мінімізує рівень евтрофікації. Така особливість створює стабільний режим розвитку біологічних процесів. У кожному з аналізованих років (окрім 2022, що може бути обмежене наявністю космоснімків без хмар на дану територію) простежуються пікові значення NDVI в літні місяці, але вони не перевищують значень 0.2-0.3.

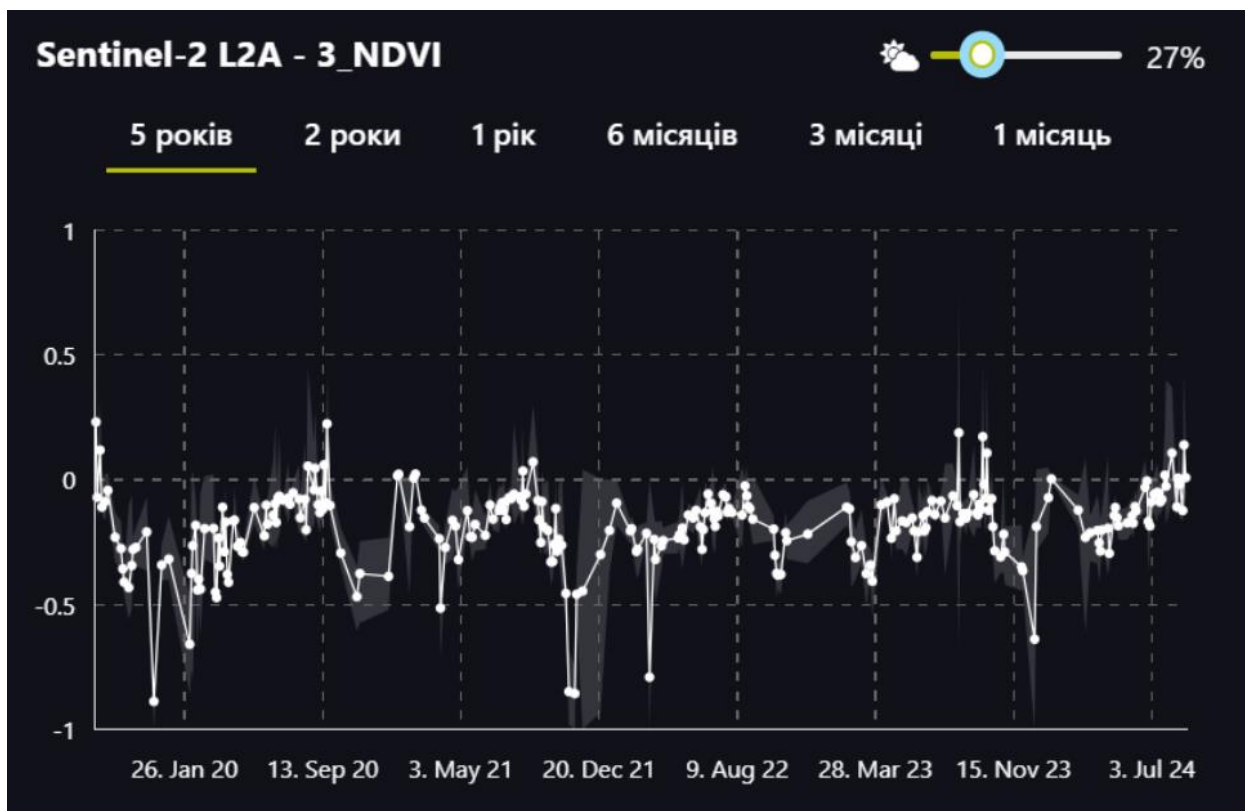


Рис. 4.27. Графік відображає динаміку індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) протягом п'яти років на території водно-болотних угідь Сульської затоки Кременчуцького водосховища.

Таким чином, Сульська затока демонструє динаміку NDVI, яка залежить від природних умов та особливостей гідрологічного режиму. Наявність нерегульованого стоку з річки Сула позитивно впливає на стан екосистеми, забезпечуючи менший рівень евтрофікації порівняно із зарегульованими водоймами та створюючи сприятливі умови для природної циркуляції води.

Індекс NDVI на території *верхів'я Кам'янського водосховища*, згідно з графіком (рис. 4.28), варіюється в діапазоні від -1 до 1, відображаючи схожі зміни у вегетаційній активності з попередніми ВБУ.

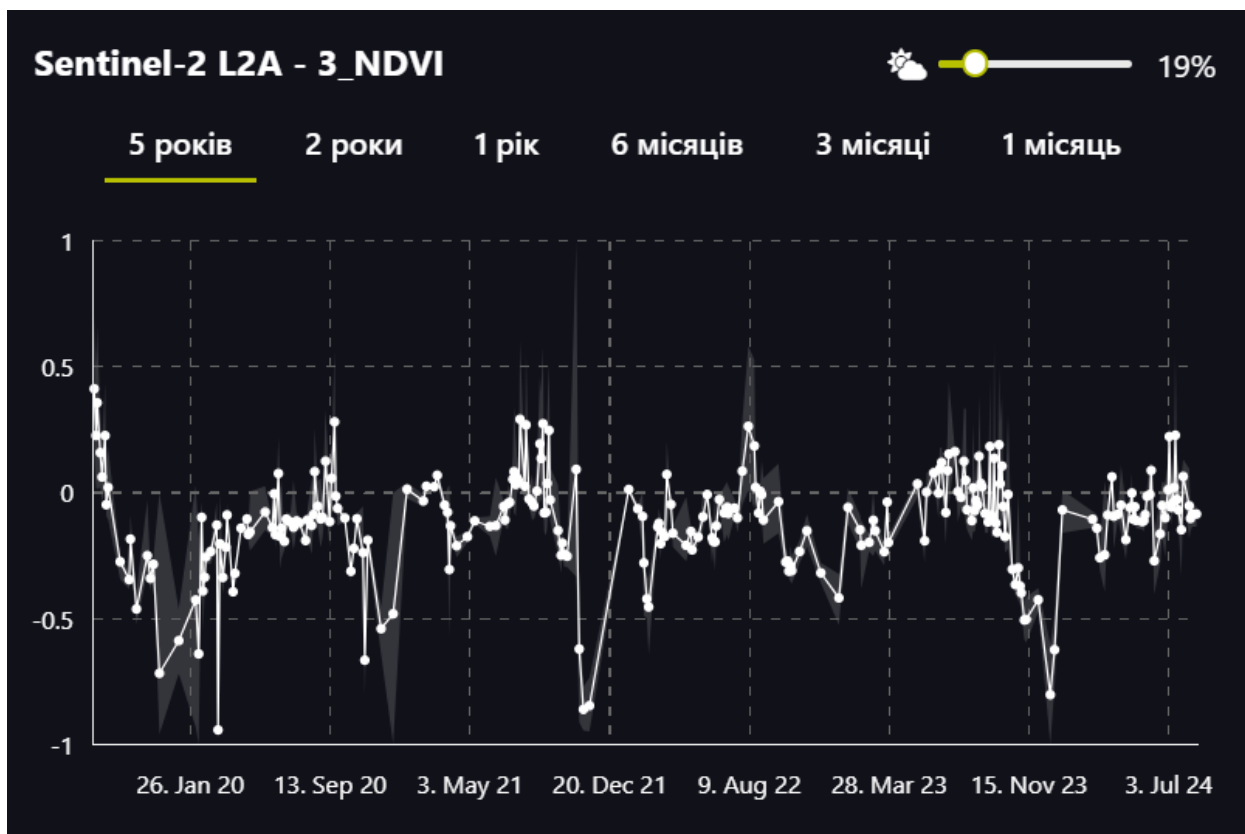


Рис. 4.28. Графік відображає динаміку індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) протягом п'яти років на території ВБУ верхів'я Кам'янського водосховища.

Аналізуючи дані за п'ятирічний період, можна помітити чітко виражену сезонну циклічність NDVI. Літні місяці традиційно демонструють найбільші пікові значення, що пояснюється активною вегетацією, яка досягає максимуму під впливом сприятливих кліматичних умов. Найбільші значення (близько 0,41) індексу зафіксовані у серпні 2019 року, що може бути наслідком надзвичайно сприятливих умов для розвитку біомаси у цей період. Крім того, у всі наступні роки пікові значення спостерігалися у серпні, але вони були дещо нижчими, хоча й залишалися високими (0.3-0.4).

Зимовий період традиційно відзначається зниженням значень NDVI до мінімуму, що відповідає зупинці вегетаційних процесів та зменшенню біологічної активності через низькі температури та скорочення світлового дня, значення тут сягають 0 або нижчі тому ними можна знівелювати.

Загалом отримані результати підтверджують, що динаміка NDVI є

надійним та досить простим для аналізу показником для оцінки рівня евтрофікації і стану водно-болотних угідь. Пікові значення індексу вказують на інтенсивні процеси біологічної продуктивності, які можуть мати серйозні екологічні наслідки, включаючи погіршення якості води та деградацію екосистеми. Ці дані є важливими для моніторингу екологічного стану водойм, а також для розробки заходів зі зменшення рівня евтрофікації, таких як контроль за надходженням поживних речовин і регулювання антропогенного впливу.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота «Розроблення системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ» є комплексним дослідженням, спрямованим на розробку сучасних підходів до моніторингу та аналізу стану водно-болотних угідь (ВБУ) із застосуванням передових геоінформаційних технологій та супутникових даних.

У роботі обґрунтовано необхідність створення системи моніторингу для водно-болотних угідь, які є важливими екосистемами, але знаходяться під значним антропогенним впливом. Особливу увагу приділено використанню даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для оцінки екологічного стану та динаміки змін угідь. У межах дослідження розроблено методику моніторингу, яка включає всі етапи — від збору даних до їхньої інтерпретації.

Використання супутників Sentinel-2 та Landsat дозволило забезпечити високу просторово-часову роздільність даних, необхідну для аналізу екологічного стану угідь. Особливості спектрального охоплення даних супутників, зокрема ближнього інфрачервоного та червоного каналів, сприяли точному визначенню змін у біомасі за допомогою вегетаційних індексів (NDVI та інших). У дослідженні проведено порівняння характеристик супутникових систем Sentinel і Landsat, що дозволило оптимізувати вибір даних для вирішення поставлених завдань.

Геоінформаційні системи (ГІС) стали ключовим інструментом у дослідженні, забезпечуючи інтеграцію, обробку, аналіз та візуалізацію супутникових даних. Завдяки інтеграції даних дистанційного зондування з результатами аналізу цифрової моделі рельєфу (ЦМР) було побудовано чіткі межі водно-болотних угідь для Київського, Канівського та Кременчуцького водосховищ. Використання геоінформаційної платформи QGIS з додатковими плагінами, а також онлайн платформи EO Browser дозволило

створити тематичні карти, графіки й аналітичні матеріали, які демонструють просторову динаміку змін ВБУ.

Особливістю роботи є розроблення функціональної моделі системи моніторингу, яка враховує такі ключові компоненти, як збір даних, їх попередня обробка, аналіз за допомогою індексів і класифікації, візуалізація результатів і формування звітів. Така модель є універсальною і може бути адаптована для моніторингу інших природних екосистем.

Практична реалізація системи моніторингу дала змогу оцінити стан водно-болотних угідь у динаміці та виявити закономірності змін у межах досліджуваних територій. Отримані дані показали збільшення площ евтрофікації у певних ділянках, що свідчить про необхідність посилення контролю за станом цих екосистем, а також проводити подальші дослідження цієї проблеми які спиралися саме на її причини.

Результати магістерської роботи рекомендовано використовувати в управлінні водно-болотними угіддями, у створенні екологічних програм моніторингу, а також для прогнозування змін екосистем під впливом зовнішніх факторів. Запропонований підхід забезпечує оперативність, точність і автоматизацію аналізу, що є важливим для сучасних екологічних досліджень. У перспективі методика може бути адаптована для інших типів ландшафтів, таких як ліси, міські території чи агроландшафти.

Таким чином, дослідження підтвердило ефективність поєднання ДЗЗ і ГІС для моніторингу водно-болотних угідь та зробило вагомий внесок у розвиток методик екологічного аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пріян, Наталія Миколаївна. "Дистанційне зондування землі." (2012)
2. Білоус, А. М., and О. В. Алексін. "Особливості дешифрування видового складу лісів Східного Полісся України на основі космічних знімків GeoEye." *Біоресурси і природокористування* 5, № 1-2 (2013): 94-101.
3. Климанський, Д. М., and В. І. Микитенко. "Способи розділення спектральних діапазонів при комплексуванні зображень." (2018).
4. Конвенція про водно-болотні угіддя, що мають міжнародне значення, головним чином як середовище існування водоплавних птахів (Рамсарська конвенція) від 02 лютого 1971 р. Редакція від 29 жовтня 1996 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_031
5. Mitsch, William J., and James G. Gosselink. *Wetlands*. John Wiley & Sons, 2015. URL: [https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=AfowBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA274&dq=Mitsch,+W.+J.,+%26+Gosselink,+J.+G.+\(2015\).+Wetlands.+John+Wiley+%26+Sons&ots=RpAq9MJLpa&sig=xngQk4wPbR72EtYyZ-a8Co_Ml](https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=AfowBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA274&dq=Mitsch,+W.+J.,+%26+Gosselink,+J.+G.+(2015).+Wetlands.+John+Wiley+%26+Sons&ots=RpAq9MJLpa&sig=xngQk4wPbR72EtYyZ-a8Co_Ml)
6. Болота Волині: особливості поширення й антропогенні зміни / О.В. Ільїна // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту: Зб. наук. пр. — 2007. — Вип. 256. — С. 367-372. — Бібліогр.: 9 назв. — укр. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/51549/32-Ilyina.pdf?sequence=1>
7. Конвенція про водно-болотні угіддя, що мають міжнародне значення головним чином як середовище існування водоплавних птахів (Рамсарська конвенція). Від 02.02.1971 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_031

8. European Space Agency. Sentinel-2 Mission. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата звернення: 06.10.2024).
9. Foody, G.M., Mathur, A. (2004). A Relative Evaluation of Multiclass Image Classification by Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6), 1335–1343.
10. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication, 351, 309.
11. Turner, M.G., Gardner, R.H., & O'Neill, R.V. (2001). *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer-Verlag New York.
12. Nicholls, R.J., Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328(5985), 1517-1520.
13. Brinson, M. M., Malvárez, A. I. (2002). Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats. *Environmental Conservation*, 29(2), 115–133.
14. TIROS Program. Television Infrared Observation Satellite. URL: <https://science.nasa.gov/mission/tiros/>
15. United States Geological Survey. Landsat Missions. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions#:~:text=Since%201972%2C%20Landsat%20satellites%20have,natural%20resources%20and%20the%20environment.>
16. Official websites use .gov. Landsat 1 First Light Image over Dallas. URL: <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-1-first-light-image-over-dallas-texas>
17. NASA. (2020). "Landsat Legacy". URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-legacy>
18. European Space Agency (ESA). (1991). "ERS-1 Mission Overview". <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers>

19. Copernicus Programme. (2014). "Sentinel-2 Technical Guide". <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
20. NASA. Landsat 8 Data Users Handbook, 2021. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8-handbook>
21. Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*. 2014. 145: 154–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.
22. Irons, J.R., Dwyer, J.L., Barsi, J.A. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*. 2012. 122: 11–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>.
23. NASA. Landsat 9 Overview. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9> (дата звернення: 21.10.2024).
24. European Space Agency (ESA). Sentinel-1: Radar Imaging Satellite for Operational SAR Applications. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (дата звернення: 21.10.2024).
25. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Levrini, G. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*. 2012. 120: 9–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>.
26. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Martimort, P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. 120: 25–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.
27. Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Arias, M., Dedieu, G., Martimort, P. Copernicus Sentinel-2 calibration and products validation status. *Remote Sensing*. 2017. 9(6): 584. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9060584>.
28. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 User Handbook. URL: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (дата звернення: 21.10.2024).

29. Wulder, M.A., Masek, J.G., Cohen, W.B., Loveland, T.R., Woodcock, C.E. Opening the archive: How free data of Landsat changed the science and applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012. 122: 2–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>.
30. Drusch, M., Gascon, F., Berger, M., Skakun, S., Middleton, E., Fomferra, N., Martimort, P. Sentinel-2: Overview, mission requirements, and user applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. 166: 170–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.001>.
31. Official websites use .gov. Spectral Comparison of Landsat 8-9 and Landsat Next. URL: <https://www.usgs.gov/media/images/spectral-comparison-landsat-8-9-and-landsat-next>
32. Sentinel Hub. (n.d.). *Sentinel-2 Bands*. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/bands/>
33. Фролова, Н. В. (2010). *Правова охорона водно-болотних угідь загальнодержавного та міжнародного значення* (Doctoral dissertation, НВ Фролова).
34. Управління водно-болотними угіддями міжнародного значення : (Метод. рек. до планування і впровадження) / під ред. Г.В. Коломійця, С.В. Таращука; відп. ред. В.А. Костюшин. – К., 2005
35. Mitsch, William J., and James G. Gosselink. *Wetlands*. John Wiley & Sons, 2015. URL: [https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=AfowBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA274&dq=Mitsch,+W.+J.,+%26+Gosselink,+J.+G.+\(2015\).+Wetlands.+John+Wiley+%26+Sons&ots=RpAq9MJLpa&sig=xngQk4wPbR72EtYyZ-a8Co_Ml](https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=AfowBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA274&dq=Mitsch,+W.+J.,+%26+Gosselink,+J.+G.+(2015).+Wetlands.+John+Wiley+%26+Sons&ots=RpAq9MJLpa&sig=xngQk4wPbR72EtYyZ-a8Co_Ml)
36. Zedler, J. B., Kercher, S., & Wetlands Conservation, R. (2005). Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 39-74. URL: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.30.050504.14424>

37. ІЛЬІНА, Ольга. "БОЛОТА ВОЛИНСЬКОЇ ОБЛАСТІ ТА ЇХ РОЛЬ У ЗБЕРЕЖЕННІ ЛАНДШАФТНОГО ТА БІОТИЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ." *Тарасюк Ніна, Полянський Сергій*: 197. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/27341/1/%D0%B7%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%92%D0%86%D0%9F%D0%9F%D0%9E%20%28pdf.io%29.pdf#page=197>

38. Національний університет біоресурсів і природокористування України. 2 лютого – Всесвітній День водно-болотних угідь (World Wetlands Day). URL: <https://nubip.edu.ua/node/120923>

39. Courtney Mobilian, Christopher B. Craft, in Encyclopedia of Inland Waters (Second Edition). Wetland Soils: Physical and Chemical Properties and Biogeochemical Processes (2022) URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128191668000499>

40. Keddy, Paul A. *Wetland ecology: principles and conservation*. Cambridge university press, 2010. URL: [https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=eVeaSqFy2VgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Keddy,+P.+A.+\(2010\).+Wetland+Ecology:+Principles+and+Conservation+\(2nd+ed.\).+Cambridge+University+Press.&ots=MgX4hg7IEf&sig=BfuZWrtL5Y9HZnVBS4HFQZzuLM4](https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=eVeaSqFy2VgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Keddy,+P.+A.+(2010).+Wetland+Ecology:+Principles+and+Conservation+(2nd+ed.).+Cambridge+University+Press.&ots=MgX4hg7IEf&sig=BfuZWrtL5Y9HZnVBS4HFQZzuLM4)

41. Эффективное управление и рациональное использование природных ресурсов водно-болотных угодий Азово-Черноморского региона Украины в условиях глобального изменения климат Рекомендация / О. В. Гушал, О. А. Дьяков, М. М. Парафило, Г. В. Парчук, С. Н. Подорожный, ЕН Попова, И.В. Студенников, И. И. Черничко. - Одесса: Центр региональных исследований, 2004. -32 с.

42. Мальцев В.І., Зуб Л.М., Карпова Г.О., Костюшин В.А., Титар В.М., Мішта А.В., Некрасова О.Д. Водно-болотні угіддя Дніпровського екологічного коридору. — К.: Недержавна наукова установа Інститут екології ІНЕКО, Карадазький природний заповідникт НАН України, 2010 URL: http://www.necu.org.ua/wpcontent/uploads/dnipro_150.pdf

43. Joosten, H., & Clarke, D. (2002). Wise use of mires and peatlands: Background and principles including a framework for decision-making. International Mire Conservation Group and International Peat Society. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3fa5336900382d4bf46805bcaadc7a07741af3f6>
44. Батрахогерпетологія: [посібник для студентів денної та заочної форми навчання напряму підготовки 7.070402 – Біологія] / укл.: І.А. Ігнатенко. – Черкаси, друкарня «Everest» ПП Пономаренко Р.В., 2010 – 175 с. URL: <http://eprints.cdu.edu.ua/440/1/b521bfd6-c0a1-4a85-9092-51c5c723ad2e.pdf>
45. Duan, Houlang, et al. "Identifying new sites of significance to waterbirds conservation and their habitat modification in the Yellow and Bohai Seas in China." *Global Ecology and Conservation* 22 (2020): e01031. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235198941930962X>
46. Історія Дніпровської ГЕС: проектування, будівництво, відновлення та сьогодення [Електронний ресурс] // Укргідроенерго. — Режим доступу: https://uhe.gov.ua/media_tsentр/novyny/istoriya-dniprovskoi-ges-proektuvannya-budivnictvo-vidnovlennya-ta-sogodennya
47. Каховська ГЕС: стійкий розвиток та підтримка регіону [Електронний ресурс] // Укргідроенерго. — Режим доступу: https://uhe.gov.ua/media_tsentр/novyny/kakhovska-ges-stiykiy-rozvitok-ta-pidtrimka-regionu.
48. Петренко І. Кременчуцька ГЕС: штрихи до історії будівництва. Газета "Народне слово", 22 травня 2014 р., № 23 (3145), ст. 9.
49. Каскад Київських ГЕС і ГАЕС – осередок розвитку міста Вишгород [Електронний ресурс] // Укргідроенерго. — Режим доступу: https://uhe.gov.ua/media_tsentр/novyny/kaskad-kiivskikh-ges-i-gaes-oseredok-rozvitku-mista-vishgorod
50. Енциклопедія сучасної України. Київське водосховище. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-11263>

51. Дніпродзержинське водосховище / А. В. Яцик // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2008. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-22222>
52. Канівська ГЕС: історія та перспективи [Електронний ресурс] // Укргідроенерго. — Режим доступу: https://uhe.gov.ua/media_tsentrv/novyny/kanivska-ges-istoriya-ta-perspektivi
53. Texty.org.ua. Як виглядало старе русло Дніпра до затоплення всіх водосховищ і тепер [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://texty.org.ua/projects/112107/230-zatoplenyh-sil-yak-vyhlyadalo-stare-ruslo-dnipra-do-zatoplennya-vsikh-vodoshovysh-i-teper/>,
54. Карта глибин водойм України [Електронний ресурс] / FisherMap. – Режим доступу: <https://ua.fishermapper.org/depth-map/>
55. USGS Earth Explorer. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
56. Copernicus Open Access Hub. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://scihub.copernicus.eu/>
57. Semi-Automatic Classification Plugin [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://plugins.qgis.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/>
58. Дистанційне зондування землі. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [Дистанційне зондування Землі \(ДЗЗ\) \(wdc.org.ua\)](http://wdc.org.ua)
59. Тараріко, Олександр Григорович. "ІНДИКАЦІЯ ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ." (2015).
60. GLOBCOVER 2009. Products Description and Validation Report [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf.

61. U.S. Geological Survey. Landsat 5. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5> (дата звернення: 27.10.2024).
62. Редактор картографічних даних – Mapshaper. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://mapshaper.org/>
63. Бутенко О. С. Комплексный подход к дешифрированию снимков по данным космического мониторинга / О. С. Бутенко, С. І. Березіна, Г. Я. Красовський // Екологія і ресурси. – 2008. – № 1 – С. 23-41.
64. Довгий С. О. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря : наукова монографія / [С. О. Довгий, Г. Я. Красовський, В. В. Радчук та ін.]. – Київ : Інформаційні технології, 2010. – 260 с.
65. Красовський Г. Я. Космічний моніторинг екологічної безпеки водних екосистем з застосуванням геоінформаційних технологій / Я. Г. Красовський. – Київ : Інтертехнологія, 2008. – 486 с.
66. Анпілова Є. С. Інформаційні технології для управління екологічною безпекою поверхневих вод : монографія / Є. С. Анпілова. – Київ : Азимут-Україна, 2013. – 104 с.
67. Стародубцев В. М. Формування дельтових ландшафтів у верхніх водосховищах дніпровського каскаду / [В. М. Стародубцев, В. А. Богданець, О. В. Томченко та ін.]. // Наукові доповіді НУБіП. – 2010. – №5. – С. 15-27.
68. Томченко О. В. Аналіз динаміки заростання макрофітами верхів'я Київського водосховища на основі ГІС/ДЗЗ-технологій [Текст] / О. В. Томченко // Ученые записи Таврического национального университета имени В.И.Вернадского. Серия: География. – 2013. – Т26, №1 – С. 156-164.
69. Томченко О. В. Використання системних методів аналізу даних ДЗЗ для визначення екологічного стану антропогенно змінених 80 ландшафтів (на прикладі мілководдя Київського водосховища) / О. В. Томченко // НЦЕМБ НАН України.
70. Томченко О. В. Дослідження антропогенних змін екосистем

засобами ГІС/ДЗЗ-технологій з використанням системних методів [Текст] / Томченко О. В., Соколовська А. В. // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. Збірник наукових праць. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна. – 2013. – Вип. 17. – С. 57- 60.

71. Томченко О. В. Системний підхід при оцінці екологічного стану мілководь Київського водосховища на основі даних ДЗЗ)

72. Загородня С. А. Дослідження екологічного стану Кременчуцького водосховища в межах Черкаської області методами ДЗЗ / [Загородня С. А., Шевякіна Н. А., Новік М. І., Радчук І. В.] // Ученые записи Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. – 2013. – Т. 26, № 1 – С. 84-91

73. Толстохатко В. А. Мониторинг днепровских водохранилищ по данным дистанционного зондирования Земли со спутника Landsat [Текст] / В. А. Толстохатко, Л. А. Антоненко, Ф. Т. Шумаков. – 2010. – № 3. – С. 49–53.

74. Словник-довідник з гідроекології [Електронний ресурс] / ред. Т. І. Дубровіна. – Херсон: ХДУ, 2018. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20180619190047/http://ekhsuir.kspu.edu/bitstream/123456789/1563/1/%D0%A1%D0%9B%D0%9E%D0%92%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%E2%80%93%D0%94%D0%9E%D0%92%D0%86%D0%94%D0%9D%D0%98%D0%9A.pdf>. – Дата звернення: 18.11.2024.

75. Гідатофіти [Електронний ресурс] // Словник.ua. – Режим доступу: <https://slovnnyk.ua/index.php?swrd=%D0%B3%D1%96%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%84%D1%96%D1%82%D0%B8>. – Дата звернення: 18.11.2024.

76. Glibert, Patricia M., et al. "Eutrophication." *Oceanography* 18.2 (2005): 198.
URI:<http://www.chnep.wateratlas.usf.edu/upload/documents/EutrophicationAndHABs.pdf>

77. **EO-browser** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=11&lat=49.32825&lng=32.8196&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https%3A%2F%2Fservices.sentinel-hub.com%2Fogc%2Fwms%2Fbd86bcc0-f318-402b-a145-015f85b9427e&datasetId=S2L2A&fromTime=2022-03-25T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2022-03-25T23%3A59%3A59.999Z&layerId=3_NDVI&demSource3D=%22MAPZEN%22.

78. Hayselden-Ashby, C. (2023). *What is NDVI analysis and how should it be interpreted?* Fieldmargin Help Center. Доступно за посыланьям: <https://support.fieldmargin.com/en/articles/2951862-what-is-ndvi-analysis-and-how-should-it-be-interpreted>

79. *What is NDVI and how is it used in monitoring vegetation?* ScienceDirect. Доступно за посыланьям: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/normalized-difference-vegetation-index>

80. Ochsner, T. E., & Wilke, T. (2021). *Remote Sensing and Vegetation Index (NDVI) for Vegetation and Agricultural Applications*. International Journal of Remote Sensing, 42(16), 5759-5775. doi:10.1080/01431161.2021.1875490

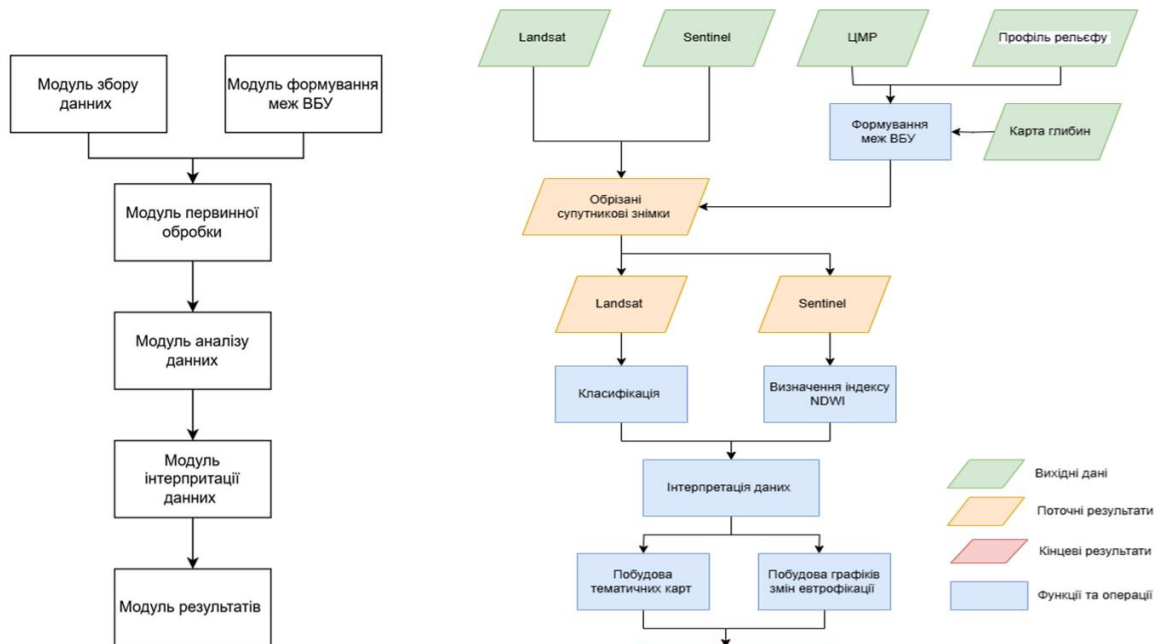
81. Landsat Science [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.

82. Copernicus Open Access Hub [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://scihub.copernicus.eu/>

83. Handbook OLI/TIRS Landsat 8 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.usgs.gov/landsat>

ДОДАТОКИ

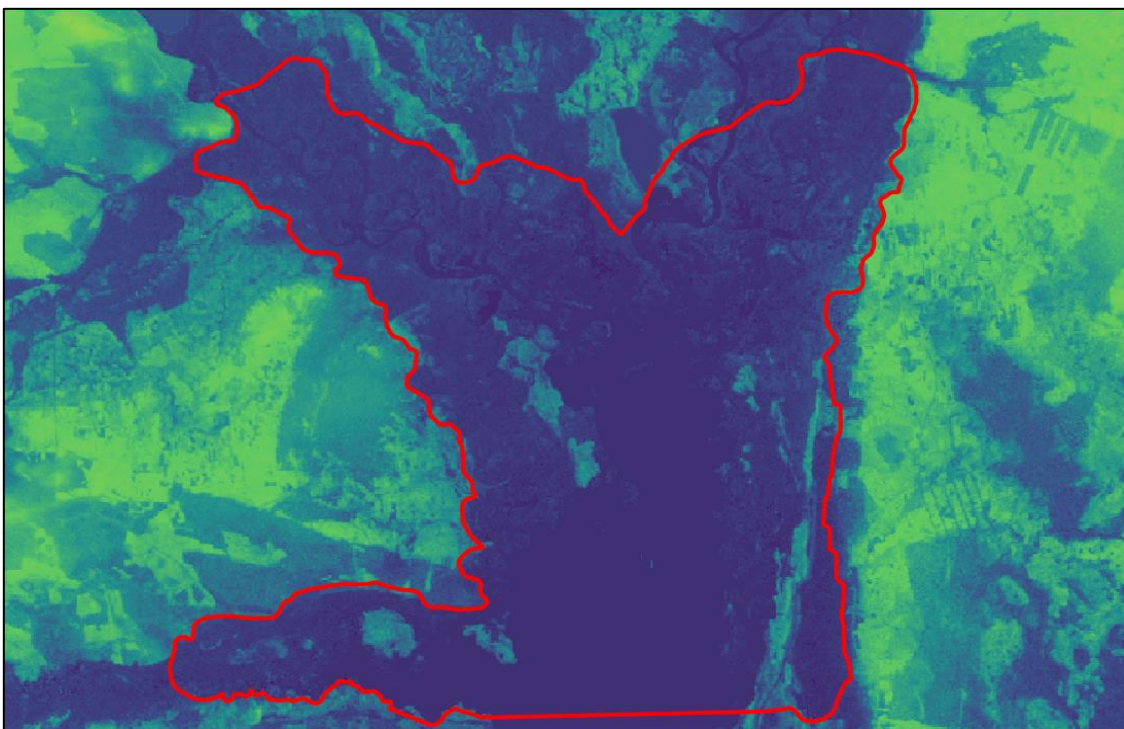
А.1 Розроблення системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ



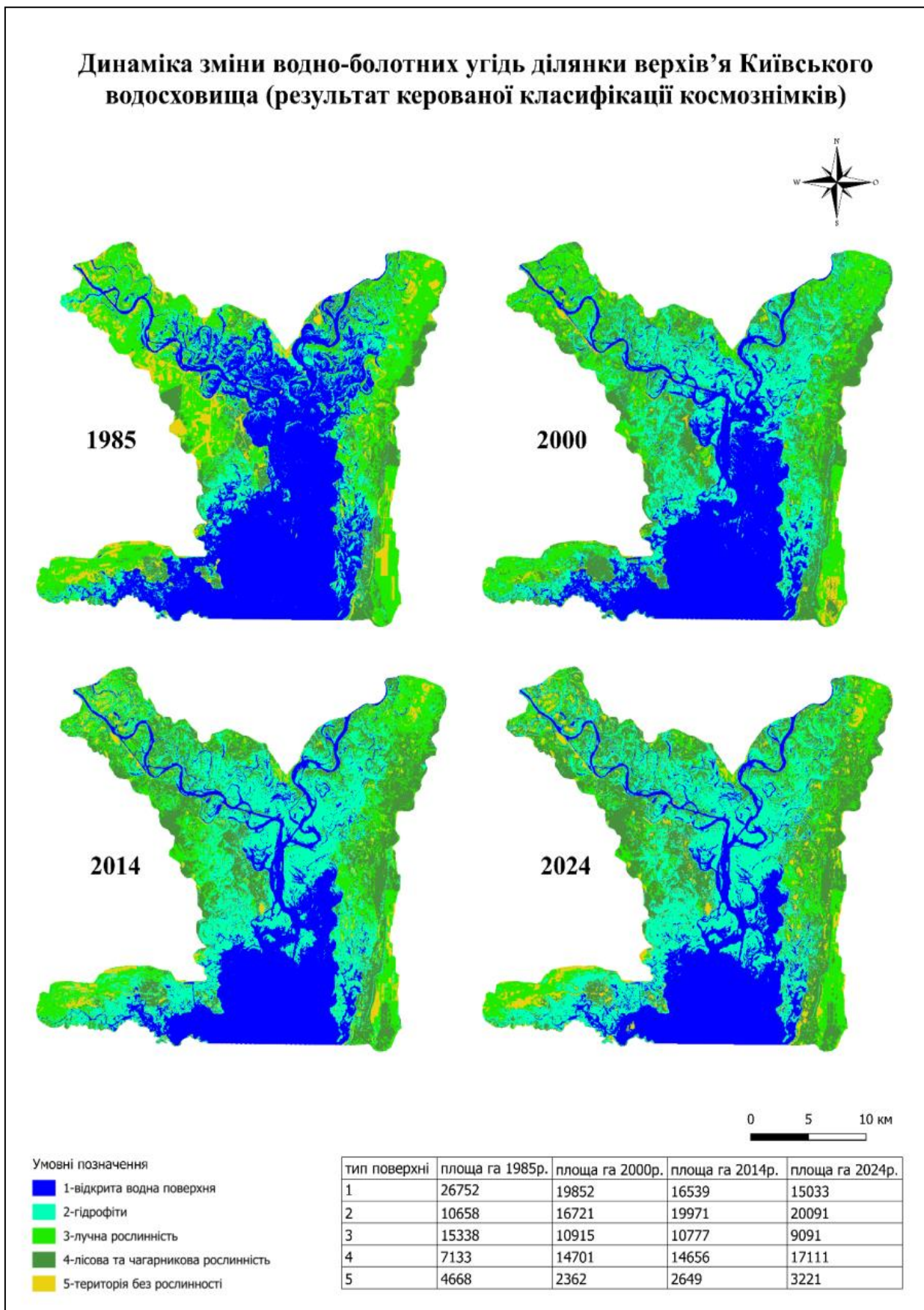
Функціональна модель системи геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ

Блок-схема здійснення геоінформаційного моніторингу водно-болотних угідь Дніпровських водосховищ

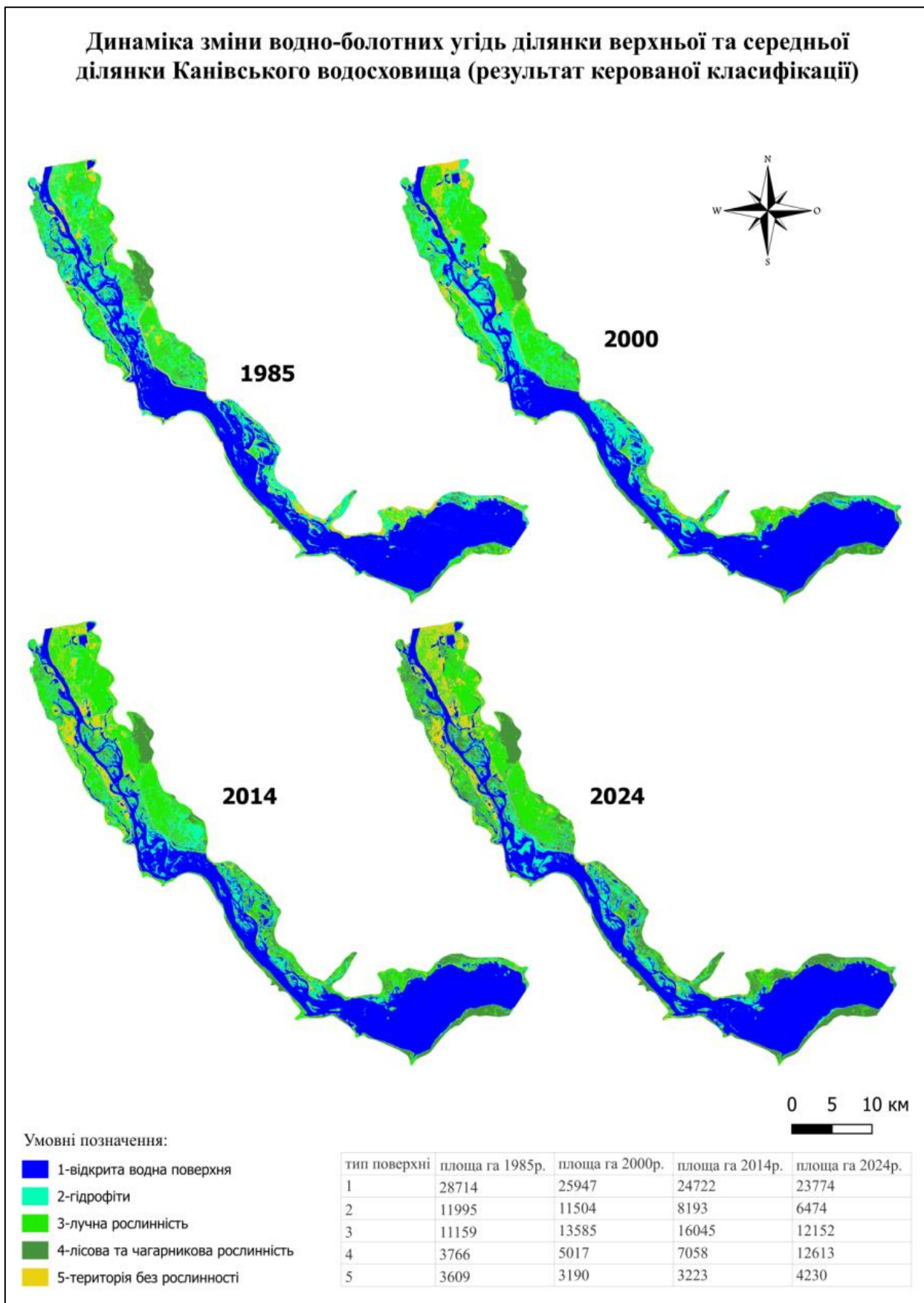
А.2 Межі ВБУ верхів'я Київського водосховища



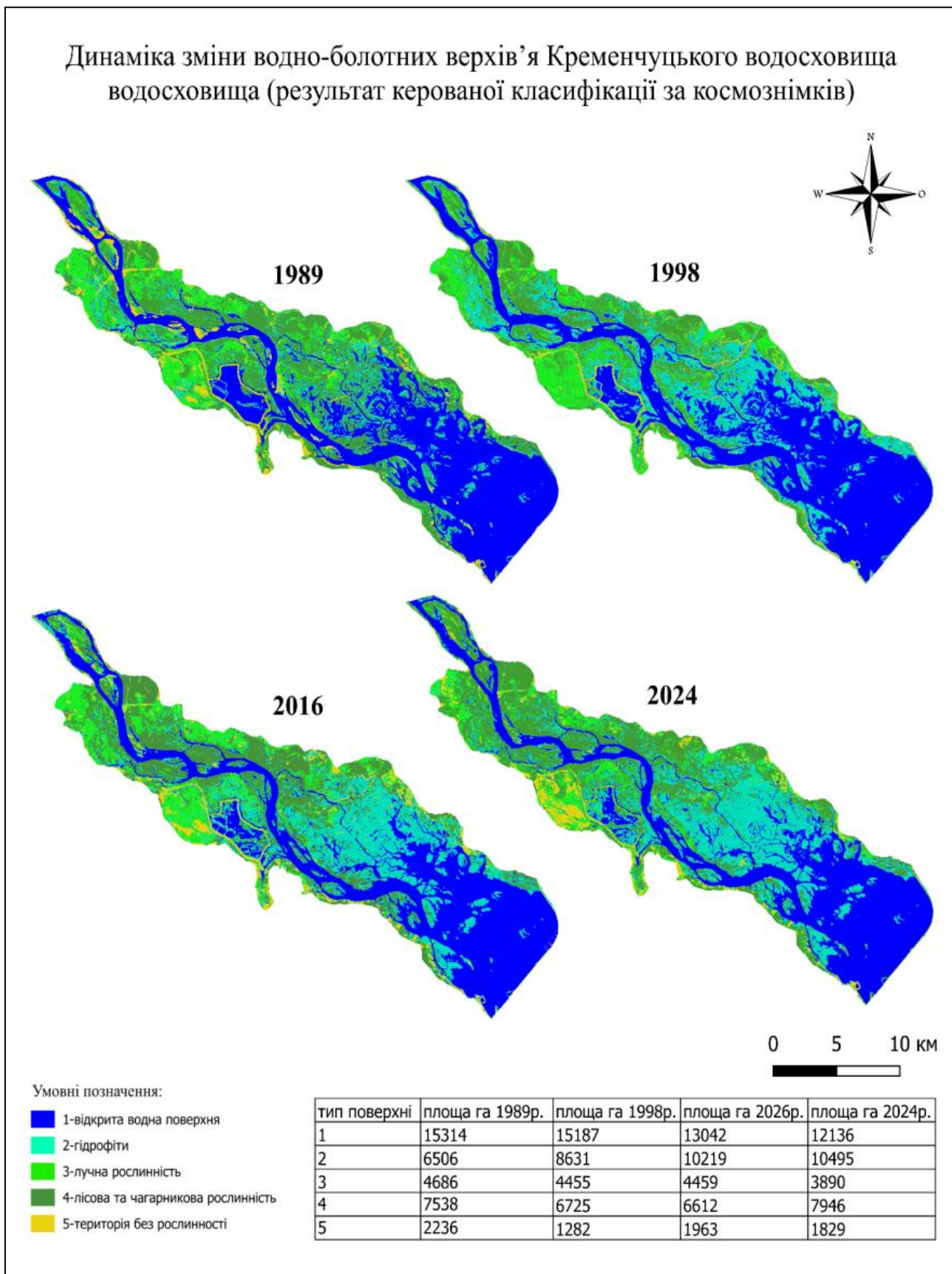
А.3. Динаміка змін водно-болотних угідь верхів'я Київського водосховища



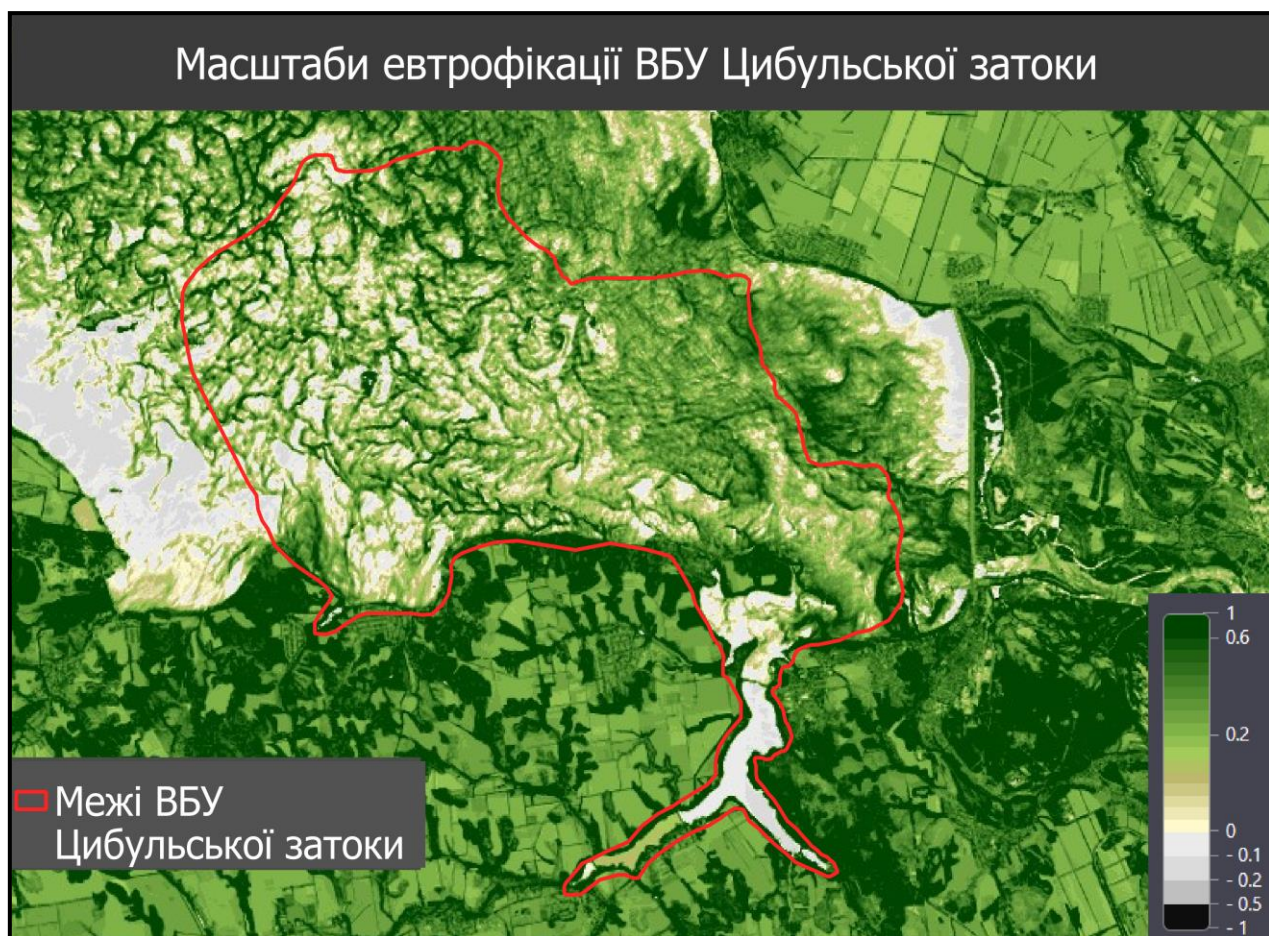
А.4 Динаміка змін водно-болотних угідь верхньої та середньої ділянки Канівського водосховища



А.5 Динаміка змін водно-болотних угідь верхів'я Кременчуцького водосховища



А.6 Мультиспектральний космознімок Sentinel-2 L2A з обрахованим індексом NDVI для території ВБУ Цибульської затоки Кременчуцького водосховища (17.08.2022р.)



А.7 Графік відображає динаміку індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) протягом п'яти років на території водно-болотних угідь Цибульської затоки та нижньої частини Кременчуцького водосховища.

