

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО  
ФАКУЛЬТЕТ АГРОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕКОЛОГІЇ  
КАФЕДРА ГЕОЕКОЛОГІЇ І ЗЕМЛЕУСТРОЮ**

«Допущено до захисту» протокол засідання  
кафедри ГЕЗ

№ 6 від « 29 » січня 2025 року

Зав. кафедрою ГЕЗ

к.с.-г.н., доцент \_\_\_\_\_ Максим ГАНЧУК

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

СВО «Магістр»

за освітньо-професійною програмою «Геодезія та землеустрій» зі  
спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»

(освітній ступень, ОПП, спеціальність)

**на тему: Використання супутникових даних для моніторингу водних  
ресурсів Запорізької області**

25 ГЗ Д 003 000000 ПЗ

Виконав: студент 21 МБГЗ групи

Шевченко С.Г.  
(прізвище та ініціали)

Консультант з ОП: к.т.н., доцент

Михайло ЗОРЯ

Керівник: д.т.н., професор

Віктор СИДОРЕНКО

Нормоконтроль к.т.н., доцент  
(науковий ступінь,  
вчене звання)

(підпис)

Ольга МАЗИКІНА  
(прізвище та ініціали)

Запоріжжя – 2025 р.

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

Інститут або факультет агротехнологій та екології  
Кафедра геоекології і землеустрою  
(назва кафедри)

Ступінь вищої освіти Магістр  
Галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»  
(шифр і назва)

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»  
(шифр і назва)

Освітня програма «Геодезія та землеустрій»  
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ГЕЗ

к.с.-г.н., доцент Максим ГАНЧУК  
(підпис) (ініціали та прізвище)

«18» жовтня 2024 р

**ЗАВДАННЯ**  
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

студенту Шевченко Сергію Геннадійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Використання супутникових даних для моніторингу водних ресурсів Запорізької області**

керівник роботи д.т.н., професор Сидоренко Віктор Дмитрович  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

затверджені наказом Ректора університету від «22» жовтня 2024 р. № 505-С

2. Строк подання студентом роботи «25» січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи дані відділу статистики, дані дистанційного зондування Землі.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: можливості використання супутникових даних в моніторингу водних ресурсів; обробка супутникових даних для моніторингу водних ресурсів; аналіз стану водних ресурсів Запорізької області на основі супутникових даних; охорона праці в галузі.

## 5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав (дата)	завдання прийняв
Розділ 4 Охорона праці в галузі	Михайло ЗОРЯ, к.т.н., доцент, завідувач кафедри цивільної безпеки	10.10.2024	10.10.2024

6. Дата видачі завдання

10.10.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи (місяць)	Відмітка керівника про виконання (засвідчується підписом)
Розділ 1 Можливості використання супутникових даних в моніторингу водних ресурсів	Вересень	Виконано
Розділ 2 Обробка супутникових даних для моніторингу водних ресурсів	Жовтень	Виконано
Розділ 3. Аналіз стану водних ресурсів Запорізької області на основі супутникових даних	Листопад	Виконано
Розділ 4 Охорона праці в галузі	Грудень	Виконано
Висновки	Січень	Виконано

Студентка

Керівник роботи

\_\_\_\_\_.

(підпис)

(підпис)

**С.Г. Шевченко**

(ініціали та прізвище)

**В.Д. Сидоренко**

(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Шевченко С.Г. Використання супутникових даних для моніторингу водних ресурсів Запорізької області. – Кваліфікаційна робота. Кафедра геоекології і землеустрою. – Запоріжжя, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 2025.

Текст викладений на 48 сторінках, містить 4 розділів, 9 рисунків, 1 таблицю, 32 літературне джерело.

У сучасних умовах супутникові технології відіграють ключову роль у моніторингу водних ресурсів, забезпечуючи оперативне та масштабне отримання даних про їх стан і динаміку. Дослідження присвячене використанню супутникових знімків та геоінформаційних технологій для оцінки якості води, визначення рівня води у водоймах, моніторингу змін берегової лінії та виявлення джерел забруднення. Розглянуто основні джерела супутникових даних, такі як Sentinel-2, Landsat-8 та MODIS, а також методи їх обробки за допомогою нормалізованих диференційних індексів (NDWI, MNDWI) та програмного забезпечення QGIS. Запропоновано підходи до автоматизації аналізу супутникових даних для ефективного управління водними ресурсами та екологічного моніторингу.

Мета роботи: обґрунтування методичних підходів до використання супутникових даних для моніторингу водних ресурсів з метою оцінки їхнього стану, динаміки змін та виявлення екологічних загроз.

**Ключові слова:** супутникові дані, водні ресурси, NDWI, моніторинг, дистанційне зондування Землі, QGIS.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ В МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	9
1.1 Сфери застосування супутникових даних .....	9
1.2 Використання супутникових даних в моніторингу водних ресурсів .....	11
<b>РОЗДІЛ 2. ОБРОБКА СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ</b> .....	16
2.1 Використання програмного забезпечення QGIS 3.38 для обробки супутникових даних.....	18
2.2 Використання нормалізованих диференційних індексів в обробці супутникових знімків .....	22
<b>РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СТАНУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ЗАПОРІЗЬКОЇ ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ</b> .....	31
3.1 Загальна характеристика водних ресурсів Запорізької області.....	31
3.2 Побудова зображень водних об'єктів Запорізької області з використанням супутникових знімків .....	35
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ В ГАЛУЗІ</b> .....	41
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	43
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	45

## ВСТУП

Раціональне використання та збереження водних ресурсів є одним із ключових завдань екологічного менеджменту та сталого розвитку. Вода відіграє критично важливу роль у підтримці екосистем, сільському господарстві, промисловості та забезпеченні життєдіяльності населення. Однак антропогенний вплив, зміни клімату та природні катастрофи спричиняють значне погіршення стану водойм, що потребує ефективних методів моніторингу та управління.

У сучасних умовах супутникові технології стали незамінним інструментом у спостереженні за станом водних ресурсів. Використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє отримувати об'єктивну, оперативну та масштабну інформацію про рівень води у водоймах, зміну берегової лінії, якість води, поширення водоростей, забруднення та інші екологічні параметри.

Актуальність цієї теми зумовлена необхідністю впровадження сучасних методів моніторингу водних об'єктів для забезпечення їх раціонального використання та збереження. Дослідження спрямоване на аналіз основних джерел супутникових даних, методів їх обробки та практичного застосування у водному моніторингу.

Водні ресурси є одним із найважливіших компонентів природного середовища, що забезпечують життєдіяльність екосистем, розвиток сільського господарства, промисловості та стабільність кліматичних процесів. Однак у сучасних умовах вони перебувають під загрозою внаслідок зміни клімату, забруднення, надмірного водокористування та деградації природних водних екосистем. Традиційні методи моніторингу водних ресурсів, такі як польові спостереження та лабораторний аналіз проб, є затратними, потребують багато часу та не завжди дають змогу отримати оперативну й комплексну інформацію.

Супутникові технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) відкривають нові можливості для моніторингу водних ресурсів, забезпечуючи швидкий та точний аналіз їх стану в масштабах великих територій. Використання супутникових даних дозволяє здійснювати спостереження за

змінами рівня води, якістю водних ресурсів, поширенням водоростей, виявленню забруднень та динамікою берегової лінії. Такі дані є особливо цінними для своєчасного реагування на екологічні загрози, прогнозування водного балансу та оптимізації управління водними ресурсами.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження ефективних методів супутникового моніторингу водних ресурсів для забезпечення їх раціонального використання, збереження та екологічної безпеки. Інтеграція сучасних технологій аналізу супутникових знімків у системи управління водними ресурсами є важливим кроком до розробки стратегій сталого розвитку та охорони довкілля.

Мета дослідження: обґрунтування методичних підходів до використання супутникових даних для моніторингу водних ресурсів з метою оцінки їхнього стану, динаміки змін та виявлення екологічних загроз.

Об'єкт дослідження: Водні ресурси та їхній стан у контексті екологічного моніторингу за допомогою супутникових даних.

Предмет дослідження: Методи та інструменти аналізу супутникових знімків для оцінки змін водних ресурсів, включаючи використання дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), нормалізованих диференційних індексів (NDWI, MNDWI), геоінформаційних технологій (ГІС) та програмного забезпечення для обробки супутникових даних.

Завдання дослідження:

1. Аналіз основних джерел супутникових даних, що використовуються для моніторингу водних ресурсів (Sentinel-2, Landsat-8).
2. Вивчення методів обробки супутникових знімків для виявлення водних об'єктів, оцінки їхнього стану та динаміки змін.
3. Дослідження застосування нормалізованих диференційних індексів (NDWI, MNDWI) для визначення меж водних об'єктів та оцінки їхніх характеристик.
4. Оцінка можливостей використання програмного забезпечення (QGIS) для аналізу супутникових даних у водному моніторингу.

## Наукова новизна дослідження

1. Обґрунтовано ефективність використання супутникових даних для комплексного моніторингу водних ресурсів, включаючи оцінку якості води, динаміку рівня водойм, зміни берегової лінії та виявлення джерел забруднення.

2. Доведено можливість використання супутникових даних для оцінки антропогенного впливу на водні ресурси, зокрема впливу промислового та сільськогосподарського забруднення, шляхом аналізу змін спектральних характеристик водних поверхонь.

Результати дослідження сприяють удосконаленню методології дистанційного зондування водних ресурсів та можуть бути використані для прийняття ефективних управлінських рішень у сфері екологічного моніторингу та раціонального водокористування.

# РОЗДІЛ 1. МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ В МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

## 1.1 Сфери застосування супутникових даних

Супутникові дані активно використовуються в різних галузях для моніторингу, аналізу та прогнозування природних і техногенних процесів. Завдяки високій точності та глобальному охопленню вони є незамінним інструментом для багатьох сфер [29-32]:

### ***1. Екологія та природокористування***

Моніторинг змін земного покриву – аналіз вирубки лісів, деградації ґрунтів, опустелювання.

Оцінка забруднення атмосфери та води – контроль якості повітря (Sentinel-5P, MODIS), виявлення нафтових плям та цвітіння водоростей.

Моніторинг змін клімату – аналіз динаміки температур, рівня океанів, льодовиків (GRACE, ICESat-2).

### ***2. Сільське господарство***

Аналіз стану посівів – оцінка вегетації, виявлення посух (Sentinel-2, Landsat).

Прогнозування врожайності – використання NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Оптимізація зрошення – контроль вологості ґрунту (SMAP).

Моніторинг хвороб рослин та шкідників – аналіз температурних та спектральних змін полів.

### ***3. Водні ресурси та гідрологія***

Моніторинг водних об'єктів – визначення площі водойм, рівня води (Sentinel-3, Jason-3).

Прогнозування паводків та посух – виявлення аномалій у водному балансі.

Виявлення забруднення водойм – контроль концентрації хімічних речовин та нафтових плям.

#### ***4. Лісове господарство***

Моніторинг лісового покриву – оцінка змін лісистості, виявлення незаконних вирубок.

Контроль лісових пожеж – виявлення термальних аномалій (MODIS, VIIRS).

Оцінка біорізноманіття – визначення складу рослинності та змін екосистем.

#### ***5. Геологія та надрокористування***

Виявлення родовищ корисних копалин – аналіз спектральних характеристик поверхні.

Моніторинг сейсмічної активності – аналіз руху земної кори (Sentinel-1, InSAR).

Моніторинг зсувів і обвалів – контроль стабільності гірських схилів.

#### ***6. Урбаністика та містобудування***

Планування міст – контроль розширення урбанізованих територій.

Моніторинг забудови – оцінка щільності будівель, виявлення незаконних забудов.

Аналіз зелених зон – контроль парків та лісопаркових територій у містах.

#### ***7. Логістика та транспорт***

Моніторинг судноплавних шляхів – контроль морських маршрутів, виявлення змін глибини водойм.

Оптимізація авіаційного та автомобільного трафіку – аналіз погодних умов, дорожньої ситуації.

Моніторинг залізничної інфраструктури – оцінка стану шляхів та мостів.

#### ***8. Оборона та безпека***

Розвідка та спостереження – виявлення переміщення військових об'єктів, моніторинг зон конфліктів.

Моніторинг стихійних лих – оцінка наслідків землетрусів, ураганів, цунамі.

Контроль державних кордонів – спостереження за нелегальною діяльністю.

### ***9. Надзвичайні ситуації та реагування на катастрофи***

Моніторинг пожеж – виявлення термічних аномалій та оцінка збитків.

Аналіз наслідків повеней – визначення затоплених територій.

Прогнозування ураганів та штормів – використання супутникових метеорологічних даних.

### ***10. Наука та освіта***

Космічні дослідження – спостереження за іншими планетами та екзопланетами.

Освітні проекти – використання супутникових даних у дослідженнях студентів та науковців.

Супутникові дані є важливим інструментом для моніторингу навколишнього середовища, оптимізації природокористування, забезпечення безпеки та управління ресурсами. Розвиток супутникових технологій сприяє більш ефективному управлінню природними та техногенними процесами у глобальному масштабі.

## **1.2 Використання супутникових даних в моніторингу водних ресурсів**

Супутниковий моніторинг водних ресурсів є потужним інструментом для оцінки стану водойм, їхніх змін у часі, забруднення та впливу кліматичних і антропогенних факторів. Завдяки супутниковим технологіям можна отримувати точні, регулярні та масштабні дані для ефективного управління водними ресурсами [29-32]:

### ***1. Основні завдання супутникового моніторингу водних ресурсів***

Визначення площі та об'єму водних об'єктів (озер, річок, водосховищ, морів, льодовиків).

Моніторинг змін рівня води та оцінка гідрологічного балансу.

Аналіз якості води та виявлення забруднень.

Виявлення підтоплень, засух, наслідків паводків і штормів.

Оцінка антропогенного впливу на водні екосистеми.

## 2. Напрями використання супутникових даних у водному моніторингу

### 2.1. Визначення площі та змін водних об'єктів

Використання оптичних та радарних супутникових знімків дозволяє:

- Оцінювати розміри та зміни водних об'єктів унаслідок посух або паводків.

- Визначати швидкість змін берегової лінії через ерозію або осушення водойм.

- Аналізувати зміну льодовикових та снігових покривів.

Супутники: Sentinel-2, Landsat-8/9, MODIS, Sentinel-1 (SAR)

### 2.2. Моніторинг рівня води

Супутникова альтиметрія дозволяє вимірювати рівень води в річках, озерах, морях та океанах.

- Використовується для прогнозування паводків і посух.

- Допомагає оцінити вплив гребель, дамб та інших гідротехнічних споруд.

Супутники: Sentinel-3, Jason-3, SWOT

### 2.3. Оцінка якості води та забруднень

Супутники здатні виявляти:

- Концентрацію хлорофілу (NDVI, NDWI), що свідчить про цвітіння води та розвиток водоростей.

- Вміст зважених часток, що показує рівень забруднення.

- Присутність нафтових плям та хімічних забруднень.

Супутники: Sentinel-2, Sentinel-3, MODIS, Landsat-8/9

### 2.4. Моніторинг повеней, засух і гідрологічних катастроф

Використання супутникових даних допомагає прогнозувати та оцінювати масштаби природних катастроф:

- Визначати затоплені території після паводків.

- Виявляти нестачу вологи та оцінювати ризики посухи.

- Оцінювати наслідки цунамі та штормів.

Супутники: Sentinel-1 (радарне зондування), MODIS, SMOS, GRACE

## 2.5. Моніторинг льодовиків та снігового покриву

Супутникові спостереження використовуються для:

- Аналізу динаміки льодовиків і айсбергів.
- Оцінки снігового покриву, що впливає на водні ресурси.

Супутники: ICESat-2, Sentinel-3, MODIS

## 3. Методи супутникового моніторингу водних ресурсів

Супутниковий моніторинг водних ресурсів базується на використанні різних методів дистанційного зондування, що дозволяють оцінювати характеристики водойм, їхні зміни, рівень забруднення та гідрологічні процеси.

Основні методи супутникового моніторингу:

Оптичне (пасивне) дистанційне зондування – використовує сонячне випромінювання, що відбивається від водної поверхні, для аналізу її характеристик.

Застосування:

- Визначення площі водойм.
- Оцінка якості води (концентрація хлорофілу, цвітіння водоростей).
- Моніторинг змін берегової лінії.

Приклад супутників: Landsat-8/9, Sentinel-2, MODIS, VIIRS.

Радарне зондування (SAR – Synthetic Aperture Radar) – використовує активне мікрохвильове випромінювання, що дозволяє отримувати дані незалежно від погоди та часу доби.

Застосування:

- Моніторинг повеней і затоплень.
- Вимірювання рівня води у водосховищах та річках.
- Визначення змін берегової лінії.

Приклад супутників: Sentinel-1, RADARSAT, TerraSAR-X.

Альтиметрія (супутникове вимірювання рівня води) – використовує лазерні або радіолокаційні висотоміри для точного вимірювання рівня води у водоймах.

Застосування:

- Оцінка рівня води у річках, озерах, океанах.
- Визначення змін рівня моря.
- Моніторинг впливу гребель та інших гідротехнічних споруд.

Приклад супутників: Jason-3, Sentinel-3, ICESat-2, SWOT.

Гіперспектральний аналіз – використовує широкий спектр електромагнітного випромінювання для визначення хімічного складу води.

Застосування:

- Виявлення забруднення води важкими металами, нафтою та іншими речовинами.

- Моніторинг якості питної води.
- Оцінка біологічної продуктивності водних екосистем.

Приклад супутників: EnMAP, PRISMA, Hyperion.

Гравіметричний метод (оцінка змін підземних вод) – використовує гравіметричні дані для визначення змін у підземних водоносних горизонтах.

Застосування:

- Оцінка запасів підземних вод.
- Виявлення виснаження ґрунтових вод.
- Аналіз змін у великих водних масах.

Приклад супутників: GRACE, GRACE-FO.

Моніторинг термальних аномалій – використовує теплові інфрачервоні сенсори для оцінки температури води.

Застосування:

- Виявлення теплових забруднень від промислових підприємств.
- Оцінка змін температури океану, що впливає на кліматичні процеси.
- Моніторинг аномальних температур у водоймах.

Приклад супутників: Landsat-8/9 (TIRS), MODIS, ASTER.

Супутникові методи моніторингу водних ресурсів дозволяють отримувати точну та регулярну інформацію про стан водних екосистем. Поєднання різних методів, таких як оптичне, радарне зондування, альтиметрія та

гіперспектральний аналіз, дає змогу комплексно оцінювати кількісні та якісні показники водних ресурсів, що є ключовим для їхнього ефективного управління.

#### *4. Переваги супутникового моніторингу водних ресурсів*

Глобальне покриття – доступ до віддалених і важкодоступних територій.

Висока частота оновлення – регулярні спостереження (від 1 дня до кількох тижнів).

Комплексний підхід – можливість інтеграції різних методів аналізу.

Оперативність – швидке отримання інформації про надзвичайні ситуації (повені, засухи).

#### *5. Виклики та обмеження*

Хмарність та атмосферні перешкоди – можуть впливати на якість оптичних знімків.

Необхідність додаткових наземних вимірювань – для підвищення точності аналізу.

Висока вартість деяких комерційних супутникових даних.

#### *6. Перспективи розвитку супутникового моніторингу водних ресурсів*

Використання штучного інтелекту для автоматичної обробки супутникових знімків.

Інтеграція даних із супутників, дронів та наземних сенсорів для комплексного моніторингу.

Запуск нових супутників із покращеною роздільною здатністю та частотою оновлення даних.

Супутникові дані є ключовим інструментом у моніторингу водних ресурсів, допомагаючи оцінювати стан водойм, прогнозувати їхні зміни та вчасно реагувати на екологічні та гідрологічні загрози. Завдяки розвитку супутникових технологій зростає точність і доступність інформації, що сприяє ефективному управлінню водними ресурсами [29-32].

## РОЗДІЛ 2. ОБРОБКА СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Супутникові дані відіграють ключову роль у моніторингу водних ресурсів, забезпечуючи ефективне спостереження за їх станом, якістю та динамікою змін. Обробка цих даних включає декілька етапів, які дозволяють отримати точну та корисну інформацію для прийняття рішень.

Супутникові дані широко використовуються для оцінки стану водних ресурсів, моніторингу забруднення, динаміки рівня води, виявлення джерел забруднення та інших екологічних досліджень. Основні джерела цих даних включають оптичні, радарні, альтиметричні та гравіметричні місії (табл. 1).

*Табл. 1*

Основні джерела супутникових даних для моніторингу водних ресурсів

Супутник / Місія	Параметри, що вимірюються	Просторова роздільна здатність	Частота знімання
Landsat-8/9 (OLI, TIRS)	Якість води, температура, рослинність, площа водойм	30 м (OLI), 100 м (TIRS)	16 днів
Sentinel-2 (MSI)	Оптичні зображення, біопродуктивність, цвітіння водоростей	10-20 м	5 днів
Sentinel-1 (SAR)	Повені, рівень води, зміни берегової лінії	10-40 м	6-12 днів
MODIS (Terra/Aqua)	Температура води, великомасштабні зміни водойм	250-1000 м	Щоденно
GRACE-FO	Запаси підземних вод, зміни рівня води	Глобально (~300 км)	30 днів
ICESat-2 (ATLAS)	Висота водної поверхні	~1 м	91 днів

Джерело: складено автором на основі [1-2]

Основні етапи обробки супутникових даних [29-32]:

Збір та попередня обробка даних – супутникові зображення отримують з відкритих джерел, таких як USGS Earth Explorer (Landsat), Copernicus Open Access Hub (Sentinel), NASA Earthdata.

Кроки попередньої обробки:

- Калібрування та корекція (атмосферна, радіометрична, геометрична).
- Видалення шумів та аномалій.
- Об'єднання сцен для створення мозаїки великих територій.

Програмне забезпечення: QGIS, SNAP, ArcGIS, Google Earth Engine.

Виділення водних об'єктів та розрахунок площі – для автоматичного виявлення водойм використовують індекси води: NDWI (Normalized Difference Water Index), MNDWI (Modified NDWI).

Застосування:

- Визначення змін площі озер та річок.
- Контроль висихання водосховищ.
- Виявлення затоплень та підтоплень.

Оцінка якості води – супутникові дані дозволяють оцінювати забруднення води за допомогою: індексів води (Turbidity Index (показник мутності), Chlorophyll-a (оцінка біомаси водоростей, цвітіння води)); спектрального аналізу (виявлення нафтових плям (Sentinel-2, Landsat-8)); оцінка забруднення важкими металами (гіперспектральні знімки).

Програмне забезпечення: ENVI, Google Earth Engine, SNAP.

Моніторинг змін рівня води – для аналізу динаміки рівня води використовують дані альтиметрії та радарної інтерферометрії.

Методи: радарне зондування (Sentinel-1, RADARSAT-2) – визначення змін рівня води у водосховищах; альтиметричні вимірювання (Jason-3, Sentinel-3) – моніторинг рівня морів та озер; гравіметрія (GRACE-FO) – виявлення змін запасів підземних вод.

Виявлення джерел забруднення – джерела забруднення виявляють за допомогою теплових знімків та хімічного аналізу води.

Методи: тепловий аналіз (MODIS, Landsat-8 TIRS) – пошук точкових скидів теплих вод (заводи, ТЕС); гіперспектральний аналіз (EnMAP, PRISMA) – оцінка складу води та виявлення забруднюючих речовин.

Використання машинного навчання для обробки супутникових даних – сучасні алгоритми обробки дозволяють автоматизувати аналіз великих масивів

даних: Deep Learning – класифікація водних об'єктів; Random Forest, SVM – оцінка якості води; Big Data аналітика (Google Earth Engine) – обробка великих обсягів супутникових знімків.

Популярні бібліотеки: TensorFlow, OpenCV, scikit-learn, GEE API.

Виклики та обмеження супутникового моніторингу: атмосферні умови – впливають на якість оптичних знімків; роздільна здатність супутників – недостатня для детального аналізу малих водойм; необхідність калібрування – потребує польових вимірювань для верифікації даних.

Рішення: використання багатоспектральних та радарних зображень; інтеграція супутникових і наземних даних (сенсори, дрони).

Супутниковий моніторинг водних ресурсів є потужним інструментом для контролю їхнього стану та оцінки ризиків. Поєднання різних методів дистанційного зондування, сучасних алгоритмів обробки та машинного навчання дозволяє ефективно аналізувати якість води, рівень забруднення та стан гідротехнічних споруд [29-32].

## **2.1 Використання програмного забезпечення QGIS 3.38 для обробки супутникових даних**

Основою виконаної роботи слугували супутникові знімки високого просторового розрізнення зроблені супутником Landsat 8, які викладені у вільному доступі на офіційному сайті Геологічної служби США (<https://usgs.gov/>).

Для дешифрування супутникових знімків використано ГІС-продукт QGIS 3.38 (вільна геоінформаційна система з відкритим кодом) [3].

QGIS – це потужне безкоштовне ГІС-програмне забезпечення з відкритим кодом, яке широко використовується для аналізу просторових даних, включаючи обробку супутникових знімків. Воно підтримує роботу з різними джерелами супутникових даних, такими як Landsat, Sentinel, MODIS тощо.

Основні можливості QGIS для супутникового аналізу [29-32]: візуалізація та обробка растрових даних – імпорт та обробка супутникових знімків; геопросторовий аналіз – розрахунок індексів (NDVI, NDWI, MNDWI); класифікація зображень – поділ знімків на класи (водні об’єкти, рослинність тощо); обробка багатоспектральних зображень – робота з каналами супутникових знімків; робота з векторними та растровими шарами – суміщення з іншими ГІС-даними; гідрологічний аналіз – визначення водних об’єктів, потоків, меж басейнів.

Формати супутникових даних, які підтримує QGIS [29-32]: растрові формати (GeoTIFF, HDF, NetCDF, JPEG 2000, ENVI, IMG); векторні формати (Shapefile, GeoJSON, KML, GPKG); супутникові дані через WMS/WMTS/WFS (підключення онлайн-сервісів).

Основні інструменти QGIS для роботи із супутниковими даними [29-32]:

Підключення супутникових знімків – джерела супутникових даних (Sentinel-2; Landsat; MODIS);

Процес завантаження та відкриття в QGIS – завантаження знімків у форматі GeoTIFF; імпорт у QGIS через Layer → Add Raster Layer; перегляд метаданих супутникових знімків.

Робота з багатоспектральними знімками: об’єднання каналів (Band Composite); використовується для створення кольорових композицій (RGB, інфрачервоні зображення); процес: Raster → Miscellaneous → Build Virtual Raster (VRT); вибір спектральних каналів (червоний (Red, R) – 640-680 нм.; зелений (Green, G) – 520-600 нм.; синій (Blue, B) – 450-510 нм.; NIR (Near-Infrared, ближній ІЧ) – 760-900 нм.).

При дешифруванні супутникових знімків в середовищі QGIS та для покращення роботи з ними розраховано коефіцієнт відбиття поверхні (формула 1) [4] (рис. 1):

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} \quad (1),$$

$\rho_{\lambda}'$  – коефіцієнт відбиття планети TOA без поправки на сонячний кут;

$M_p$  – специфічний для діапазону мультиплікативний коефіцієнт зміни масштабу з метаданих (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, де x — номер діапазону);

$A_p$  – специфічний для діапазону адитивний коефіцієнт масштабування з метаданих (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, де x — номер діапазону);

$Q_{cal}$  – квантований і відкалібрований стандартні значення пікселів продукту (DN).

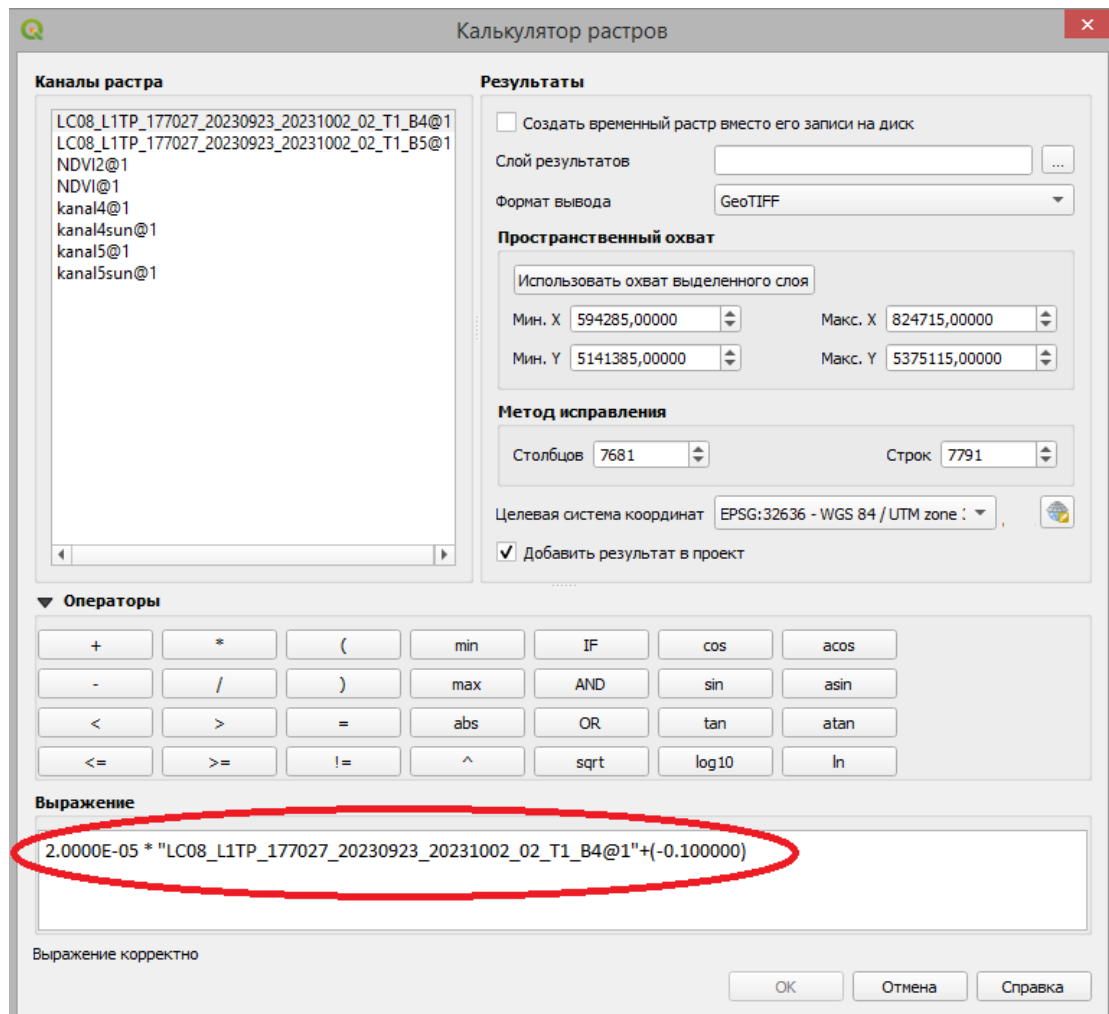


Рис. 1 Введення даних перетворення DN відбивної смуги на коефіцієнт відбиття TOA в «Калькулятор растр»

Наступним етапом виконано розрахунок коефіцієнту відбиття TOA з поправкою на кут сонця (формула 2) [4] (рис. 2):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_{SE})} \quad (2),$$

$\rho_\lambda$  – коефіцієнт відбиття планети TOA;

$\theta_{SE}$  – місцевий кут підйому сонця. Кут піднесення сонця в центрі сцени в градусах надається в метаданих (SUN\_ELEVATION);

$\theta_{SZ}$  = місцевий сонячний зенітний кут.

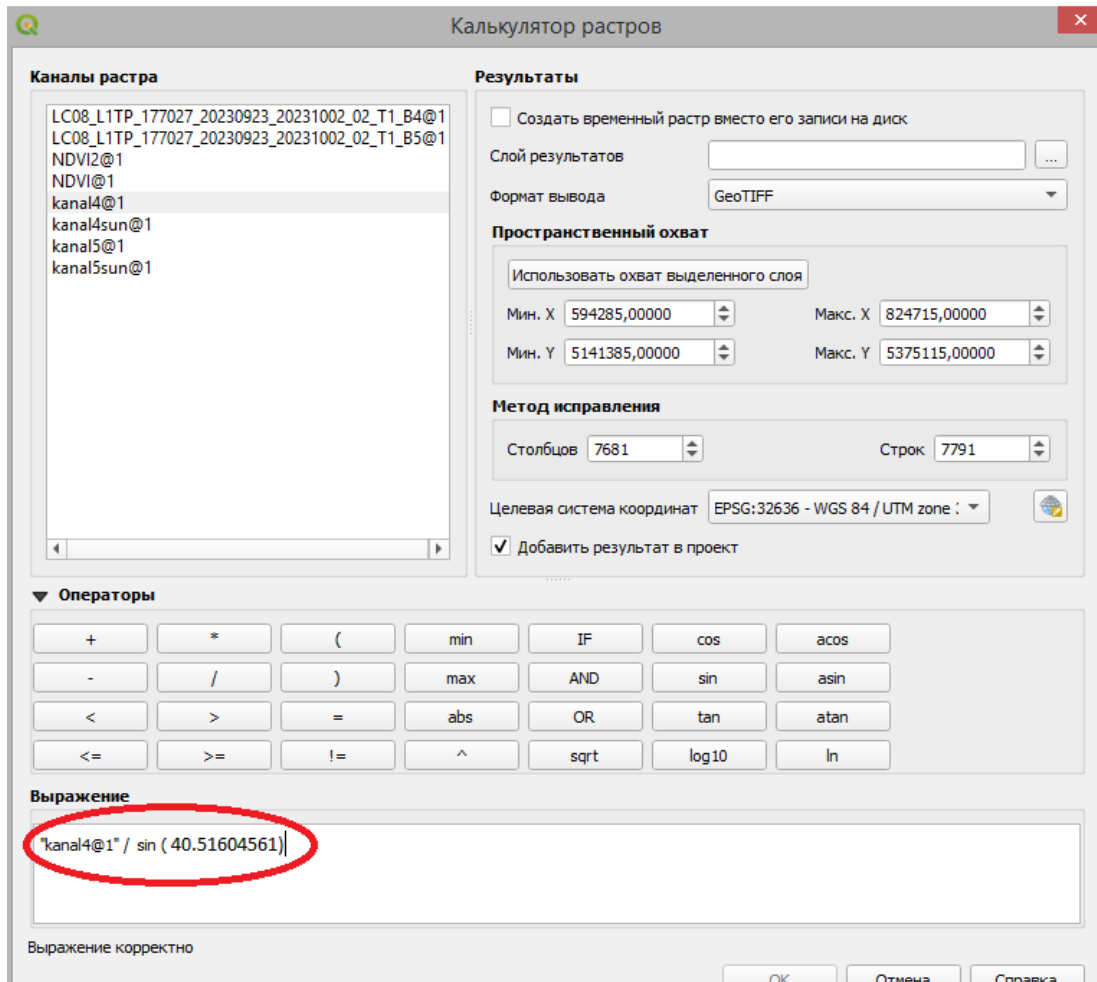


Рис. 2 Введення даних коефіцієнту відбиття TOA з поправкою на кут сонця в «Калькулятор реєстру»

Аналіз змін водних об'єктів: методи оцінки змін водойм (NDWI/MNDWI для оцінки змін площі води); аналіз часових рядів (Time Series Analysis) – аналіз змін у різні дати); зіставлення супутникових знімків за різні періоди (Processing Toolbox → Raster → Change Detection).

Автоматизація обробки супутникових даних у QGIS [29-32]: Інструменти для автоматизації (Python (PyQGIS) – написання скриптів для пакетної обробки;

Model Builder: створення автоматизованих робочих процесів; генерація карт у автоматичному режимі: використання Atlas у QGIS).

Підключення QGIS до зовнішніх сервісів: супутникові сервіси (Google Earth Engine (GEE) – аналітика великих супутникових даних; Copernicus Data Hub – доступ до Sentinel-даних; OpenStreetMap (OSM) – векторні шари для аналізу територій).

QGIS – потужний інструмент для аналізу супутникових даних, що дозволяє виконувати: візуалізацію супутникових знімків; розрахунок спектральних індексів (NDWI, MNDWI); класифікацію земного покриву; аналіз змін водних ресурсів у часовому розрізі; автоматизацію обробки даних за допомогою Python.

## **2.2 Використання нормалізованих диференційних індексів в обробці супутникових знімків**

Нещодавнє оприлюднення архіву Landsat робить картографування та моніторинг водних площ можливим і доступним навіть у глобальному масштабі. Геологічна служба США (USGS) оприлюднила продукти Landsat, найдовший архів супутникових знімків, у 2008 році, надавши можливість відстежувати динаміку площі водних об'єктів з роздільною здатністю 30 метрів у глобальному та континентальному масштабах. Із запуском у лютому 2013 року супутника Landsat 8, на якому встановлено датчик OLI (Operational Land Imager, роздільна здатність 30 м), місія Landsat продовжиться і в наступному десятилітті. Ефективна технологія зйомки, обробка даних і процедури обміну надають більше можливостей доступу до високоякісних зображень порівняно з попередніми супутниками Landsat [5-7]. Кілька нещодавніх робіт, таких як Verpoorter та ін. (2014) [8] і Liao та ін. (2014) [9], створюють глобальні інвентаризації озер, використовуючи знімки Landsat приблизно 2000 року, включені до набору даних Глобального обстеження земель (GLS) 2000 року. Ці картографічні продукти не перевіряються за допомогою суворих процесів забезпечення якості та контролю якості (QA/QC) і можуть містити як помилки,

так і пропуски через різноманітний вигляд водної поверхні, вузькі ділянки річок, неминуче забруднення хмарами, гірські тіні тощо. Крім того, нанесені на карту площі озер відображають ситуацію на дати зйомки, пов'язані з вихідними знімками, відібраними в рамках проекту GLS, який не спрямований на дослідження озер. Ці дати зйомок можуть не збігатися зі стабільними сезонами в різних регіонах, тому отримані результати мають значну невизначеність через сезонну мінливість озер.

Для аналізу супутникових знімків використовують нормалізовані диференційовані індекси, які дозволяють виділяти та класифікувати різні об'єкти на земній поверхні, оцінювати стан рослинності, водних ресурсів, міських територій, снігового покриву та визначати рівень деградації ґрунтів шляхом обчислення різниці відбиття у певних спектральних діапазонах.

Використання спектральних індексів, які отримують під час обробки космічних знімків, є джерелом інформації про загальний стан якості води у водних об'єктах. Найчастіше за допомогою спектральних індексів з'ясовують ступінь евтрофування водойм (Плічко та ін., 2021; Plichko et al., 2021) [10-11].

Всі існуючі нормалізовані індекси води використовують два діапазони (один видимий діапазон і один або NIR, або SWIR) для виділення водних об'єктів [21-24], і жодне дослідження не об'єднувало NIR і SWIR в один NDWI.

### ***Нормалізований диференційний індекс каламутності (NDTI)***

Каламутність води можна визначити за допомогою індексу NDTI (Normalized Difference Turbidity Index). Нормалізація призводить до значень в діапазоні від -1 до +1, що дозволяє порівнювати багато різних спектральних діапазонів. Алгоритм NDTI був розроблений Lacaux J.P. у 2006 році [12]. NDTI визначається за відбиттям у червоному (0,61-0,68 мкм) та зеленому (0,5-0,59 мкм) діапазонах за формулою:

$$NDTI = (R_{Red} - R_{Green}) / (R_{Red} + R_{Green}),$$

де  $R_{Red}$  - значення відбиття від червоної ділянки спектра,  $R_{Green}$  - значення відбиття від зеленої ділянки спектра.

### ***Нормалізований диференційний точковий індекс (NDPI)***

Новий індекс стійкий до танення снігу і здатний точніше відстежувати весняну фенологію в засніжених регіонах. Цей індекс – це нормалізований індекс різниці фенології (NDPI), який є 3-смуговим індексом, що використовує спектральний сигнал з червоного, ближнього інфрачервоного (NIR) та короткохвильового інфрачервоного (SWIR) діапазонів відповідно (як і в NDVI та NDII). NDPI є стійким до танення снігу і може вказувати на GUD навесні краще, ніж інші VI (наприклад, NDVI) в засніжених регіонах, особливо в листяних екосистемах [13].

NDPI розроблений на основі Gonsamo et. al. (2012) [14]. Найбажанішою властивістю NDPI є відсутність ефекту танення снігу, але він чутливий до початкового росту рослинності під час весняної вегетації. Для досягнення цієї мети ми спочатку дослідили спектральні криві відбиття типових основних компонентів земної поверхні (рис. 1). Відбивна здатність як ґрунту, так і снігу монотонно змінюється від червоної до SWIR довжини хвиль (зростає для ґрунту; зменшується для снігу). Для рослинності, однак, коефіцієнт відбиття NIR-діапазону є високим, тоді як коефіцієнт відбиття червоного та SWIR-діапазонів є низьким. Щоб використати цю унікальну особливість, ми SWIR) як зважену суму спочатку визначаємо новий коефіцієнт відбиття червоної та SWIR ( $\rho_{red}$ ), щоб мінімізувати різницю між ґрунтом і снігом, які є основними компонентами земної поверхні у міжвегетаційний період:

$$\rho_{red}^{SWIR} = \alpha \times \rho_{red} + (1 - \alpha) \times \rho_{SWIR}$$

де  $\alpha$  - ваговий коефіцієнт, який необхідно визначити, і очікується, що він повинен мати таке значення, щоб  $\rho_{red}$  було близьким до відповідного  $\rho$  NIR.

Підстилка не розглядається окремо, оскільки вона має схожу спектральну криву з ґрунтом [15]. Для рослинності  $\rho_{red}$  SWIR є малим, оскільки рослинність має малу відбивну здатність як у червоному, так і в SWIR діапазонах. Потім ми використовуємо форму «нормалізованої різниці» для побудови NDPI наступним чином:

$$NDPI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}^{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}^{SWIR}}$$

При відповідному значенні  $\alpha$  значення NDPI є малим для ґрунту та снігу, але великим для рослинності. Коли  $\alpha$  дорівнює 0 та 1, NDPI наближається до NDII та NDVI відповідно.

### ***Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI)***

Нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) є, мабуть, найбільш широко застосовуваним спектральним індексом дистанційного зондування для моніторингу земної поверхні. З часу першого повідомлення про його використання у 1973 році [16-17] термін NDVI зустрічається у майже 121 000 наукових статтях, матеріалах конференцій та книгах (Google Scholar). Індекс ґрунтується на оптичних властивостях клітинної структури листя: фотосинтетичні пігменти (хлорофіл, пов'язані з ним світлозбираючі пігменти та допоміжні пігменти) ефективно поглинають випромінювання у видимому діапазоні спектра (для живлення фотосинтезу) і відбивають випромінювання в ближній інфрачервоній області. Проста формула NDVI та її прямий зв'язок з фотосинтетичною здатністю рослинності є проксі для широкого спектру важливих характеристик і функцій рослинності (наприклад, частка фотосинтетичного випромінювання, що поглинається наметом, площа листя, «зеленість» намету, валова первинна продуктивність), що має безліч застосувань у сільському, лісовому господарстві, екології, біорізноманітті, моделюванні оселищ, міграціях видів, фенології поверхні землі, процесах земної системи (кругообіг поживних речовин, чиста первинна продуктивність, випаровування), а також в економічних, соціальних та медичних науках.

Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) - це індекс, який описує частку рослинності шляхом вимірювання різниці в ближній інфрачервоній частині електромагнітного спектру, яка сильно відбивається зеленою рослинністю, і червоною частині спектру, яка поглинається рослинністю:

$$NDVI = \frac{NIR(\text{band5}) - R(\text{band4})}{NIR(\text{band5}) + R(\text{band4})}$$

де, NIR - ближній інфрачервоний діапазон (смуга 5), а R - червоний діапазон (смуга 4)

### ***Індекс співвідношення води (WRI)***

WRI (Water Ratio Index) – індекс співвідношення води. Розраховується за формулою [28]:

$$WRI = \frac{\rho_{GREEN} + \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR 1}}$$

Для виділення водних об'єктів прийняте порогове значення 1 і вище.

### ***Нормалізований диференційний водний індекс (NDWI)***

Зображення дистанційного зондування вже давно використовуються для оцінки водних ресурсів та управління прибережними територіями. Ці програми включають визначення меж відкритих водойм за допомогою тематичних методів вилучення інформації. Існують різні методи вилучення інформації про воду зі знімків дистанційного зондування, які, залежно від кількості використуваних діапазонів, зазвичай поділяються на дві категорії: односмугові та багатосмугові. Односмуговий метод зазвичай передбачає вибір смуги з багатоспектрального зображення для вилучення інформації про відкриту воду [18]. Потім для цієї смуги визначається поріг, який дозволяє відрізнити воду від суші. Однак суб'єктивний вибір порогового значення може призвести до переоцінки або недооцінки площі відкритої води, а вилучена інформація про воду часто змішується з тінювим шумом. Багатосмуговий метод використовує переваги відмінностей у відбитті кожної задіяної смуги. Існує два способи отримання інформації про воду за допомогою багатодіапазонного методу. Один з них полягає в аналізі сигнатурних особливостей кожної наземної цілі в різних спектральних діапазонах, з'ясуванні сигнатурних відмінностей між водою та іншими цілями на основі аналізу, а потім у використанні логічного дерева «якщо-

тобто-інше» для відокремлення суші від відкритої води [19-20] (Yu et al. 1998, Xu 2002).

Інший підхід - це підхід на основі співвідношення смуг з використанням двох мультиспектральних смуг. Одна з них складається з видимих довжин хвиль і ділиться на іншу, як правило, з ближньої інфрачервоної (NIR) довжини хвиль. В результаті рослинність і наземні об'єкти пригнічуються, а водні об'єкти посилюються. Однак цей метод може пригнічувати неводні об'єкти, але не видаляти їх, і тому McFeeters (1996) [21] запропонував нормалізований різницевий водний індекс (NDWI) для досягнення цієї мети. Проте, NDWI не може ефективно придушити сигнал від забудованих земель, тому посилені або вилучені водні об'єкти все ще змішуються з шумом від забудованих земель. Тому необхідно вдосконалити індекс, і NDWI модифіковано, щоб вирішити цю проблему.

NDWI виражається наступним чином (McFeeters 1996) [21]:

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

де Green - це зелений діапазон, наприклад, TM band 2, а NIR - це ближній інфрачервоний діапазон, наприклад, TM band 4.

Цей індекс призначений для того, щоб (1) максимізувати відбиття води за рахунок використання зеленої довжини хвиль; (2) мінімізувати низьке відбиття NIR від водних об'єктів; і (3) скористатися перевагами високого відбиття NIR від рослинності та ґрунту. В результаті, водні об'єкти мають позитивні значення і, таким чином, посилюються, в той час як рослинність і ґрунт зазвичай мають нульові або негативні значення і, таким чином, пригнічуються [21]. Однак, застосування NDWI у водних регіонах із забудованим земельним фоном не досягає своєї мети, як очікувалося. Отримана інформація про воду в цих регіонах часто змішується з шумами від забудованих земель. Це означає, що багато об'єктів забудови також мають позитивні значення на зображенні NDWI.

Xu (2006) зазначає, що деякі забудовані земельні об'єкти мають позитивні значення на зображенні NDWI [25]. Таким чином, вилучена інформація про воду

часто змішувалася з шумами забудови. Його дослідження показало, що значення SWIR для забудованої території було більшим, ніж для зеленої смуги. Для того, щоб зменшити цей тип помилки, алгоритм NDWI було модифіковано шляхом заміни смуги SWIR, наприклад, смуги 5 Landsat TM, на смугу NIR, яка називається MNDWI. Після заміни діапазону рослинність і ґрунт все ще зберігають від'ємне значення, оскільки їхнє спектральне значення в інфрачервоному діапазоні все ще більше, ніж у зеленому діапазоні. Формула MNDWI має вигляд

$$\text{MNDWI} = \frac{\rho_{\text{Band2}} - \rho_{\text{Band5}}}{\rho_{\text{Band2}} + \rho_{\text{Band5}}}$$

де  $\rho_{\text{Band5}}$  - значення коефіцієнта відбиття в SWIR-діапазоні супутника Landsat 8 TM. Метод AWEI використовує зовсім іншу стратегію виділення водних об'єктів порівняно з двома вищезгаданими водними індексами. Feyisa et al. (2014) [26] виділили чисті пікселі різних об'єктів суші та води зі знімка Аддис-Абеби, а потім використали чисті пікселі для розрахунку коефіцієнта, який мав на меті зробити значення пікселів неводних об'єктів нижче 0, а значення пікселів води вище 0. Це показало, що 0 може бути розумним порогом для класифікації сірих зображень на бінарні класи (водні та неводні) для цілого ряду умов навколишнього середовища. Формули AWEI виражаються наступним чином:

$$\text{AWEI}_{\text{nsh}} = 4 \times (\rho_{\text{Band2}} - \rho_{\text{Band5}}) - (0.25 \times \rho_{\text{Band4}} + 2.75 \times \rho_{\text{Band7}})$$

$$\text{AWEI}_{\text{sh}} = \rho_{\text{Band1}} + 2.5 \times \rho_{\text{Band2}} - 1.5 \times (\rho_{\text{Band4}} + \rho_{\text{Band5}}) - 0.25 \times \rho_{\text{Band7}}$$

де  $\rho_{\text{Band1}}$  - значення коефіцієнта відбиття синього діапазону Landsat 8 TM, а  $\rho_{\text{Band7}}$  - значення коефіцієнта відбиття SWIR діапазону. Підрядковий індекс «nsh» вказує на те, що індекс підходить для ситуації, коли тіні не є основною проблемою, тоді як підрядковий індекс «sh» вказує на те, що індекс може бути застосований для ділянок з тінювими або темними поверхнями.

Реальний сценарій завжди містить різноманітні водні об'єкти та елементи рельєфу з різними спектральними характеристиками. На рисунку 3 представлено усереднені спектральні профілі чотирьох типових об'єктів, вилучених зі знімків

Landsat 8 TM. З рисунка видно, що як NDWI, так і MNDWI можуть добре відокремлювати рослинність від води, оскільки спектральні значення рослинності в NIR і SWIR діапазонах більші, ніж у зеленої смуги. Однак, для пікселя каламутної води значення NIR смуги зазвичай більше, ніж зеленої, тоді як SWIR смуга менше, ніж зелена; для пікселя рослинності в тіні, SWIR смуга здебільшого менше, ніж зелена, тоді як NIR смуга, як правило, більше, ніж зелена. Якщо ми застосуємо індекси води для сцен і використаємо поріг за замовчуванням 0, NDWI не зможе правильно класифікувати каламутну воду за класом води, а MNDWI також неправильно класифікує рослинність у тіні як воду. Для того, щоб зменшити помилки, ми запропонували новий водний індекс WNDWI, який використовує середньозважене значення NIR та SWIR для заміни діапазону NIR або SWIR. Вираз WNDWI виглядає наступним чином [27]:

$$\text{WNDWI} = \frac{\rho_{\text{Band2}} - \alpha \times \rho_{\text{Band4}} - (1 - \alpha) \times \rho_{\text{Band5}}}{\rho_{\text{Band2}} + \alpha \times \rho_{\text{Band4}} + (1 - \alpha) \times \rho_{\text{Band5}}},$$

де  $\alpha \in [0; 1]$  - ваговий коефіцієнт. Зокрема, якщо  $\alpha = 1$ , то WNDWI стає NDWI, а якщо  $\alpha = 0$ , то WNDWI ідентичний MNDWI.

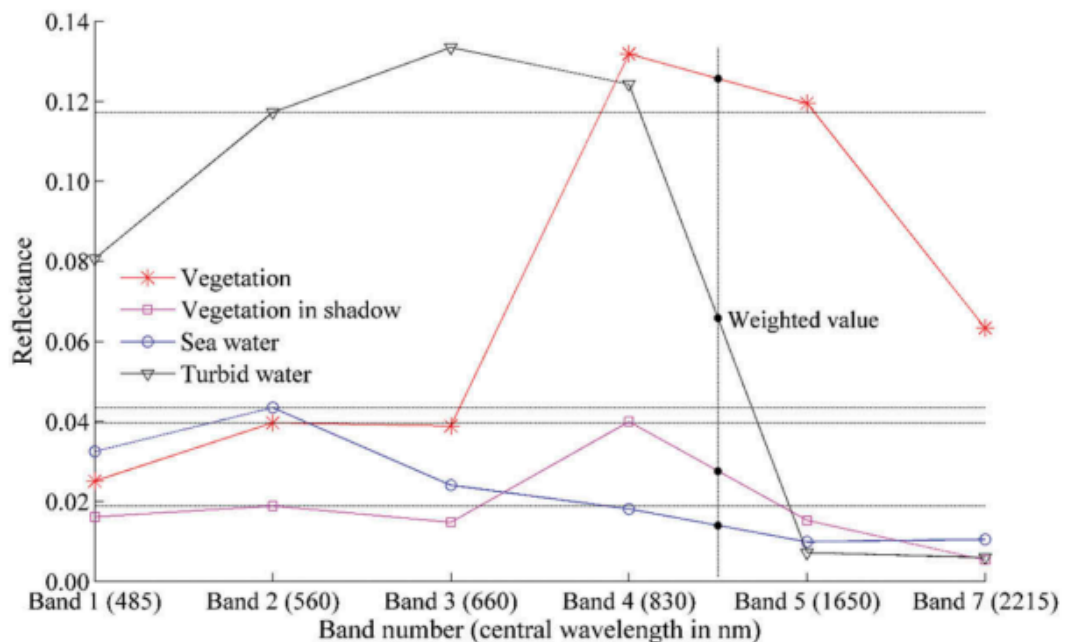


Рис. 3 Усереднені спектральні профілі рослинності, рослинності в тіні, морської води та каламутної води

Джерело: [27]

На рисунку 3 середньозважене значення NIR і SWIR каламутної води є меншим за значення зеленої смуги, а середньозважене значення двох смуг рослинності в тіні є більшим за зелену смугу, коли  $\alpha$  присвоєно відповідне значення (див. зважені значення на рисунку 3). Таким чином, WNDWI може правильно класифікувати каламутну воду як водний об'єкт, а рослинність у тіні - як неводний об'єкт. WNDWI також є нормалізованим індексом, що означає, що діапазон індексу становить від -1 до 1. Як і у випадку з NDWI та MNDWI, 0 можна вважати пороговим значенням за замовчуванням для результатів WNDWI. У наступному розділі експерименти з різними сценаріями призначені для перевірки ефективності чотирьох водних індексів.

## РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ СТАНУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ЗАПОРІЗЬКОЇ ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

### 3.1 Загальна характеристика водних ресурсів Запорізької області

Запорізька область розташована у південно-східній частині України і належить до маловодних регіонів країни. Основними джерелами водних ресурсів області є річкові, підземні, озерні та штучні водні об'єкти, які відіграють важливу роль у забезпеченні потреб населення, промисловості, сільського господарства та енергетики.

#### 1. Річкові ресурси

Основною водною артерією області є річка Дніпро, яка перетинає територію регіону з північного заходу на південний схід. На Дніпрі розташоване Каховське водосховище, яке забезпечує водопостачання, гідроенергетику та зрошення земель.

Інші значні річки:

- Конка – притока Дніпра, що відіграє важливу роль у місцевому водопостачанні.
- Молочна – впадає в Молочний лиман і використовується для зрошення.
- Обитічна, Берда, Корсак – малі річки, що впадають у Азовське море та мають екологічне значення.

Річкова мережа області розріджена, а більшість малих річок зазнає значного антропогенного навантаження та забруднення.

#### 2. Озера та лимани

В області є низка невеликих природних озер та лиманів, зокрема:

- Молочний лиман – важливий природний об'єкт, що має велике екологічне значення.
- Солоні озера, які використовуються у рекреаційних та лікувальних цілях.

#### 3. Штучні водойми та водосховища

Крім Каховського водосховища, в області є низка менших водосховищ та ставків, які використовуються для зрошення, промислових і рекреаційних потреб.

#### 4. Підземні води

Запорізька область має значні запаси підземних вод, які використовуються для питного водопостачання. Водозабір здійснюється з артезіанських свердловин, проте через інтенсивне водокористування та забруднення спостерігається зниження рівня підземних вод.

#### 5. Водні ресурси Азовського моря

Південна частина області має вихід до Азовського моря, що є важливим для рибальства, рекреації та економіки регіону. Однак море зазнає значного антропогенного впливу, що призводить до забруднення та евтрофікації.

#### 6. Проблеми водних ресурсів області

- Забруднення річок промисловими та сільськогосподарськими стоками.
- Обміління малих річок та лиманів.
- Зменшення запасів підземних вод через надмірне водокористування.
- Засолення ґрунтів унаслідок нераціонального зрошення.
- Негативний вплив військових дій на стан водних об'єктів.

Водні ресурси Запорізької області є обмеженими і потребують ефективного управління, раціонального використання та екологічного моніторингу. Використання сучасних методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій дозволяє отримувати оперативні дані про стан водних об'єктів та розробляти ефективні стратегії їх охорони та відновлення.

Запорізька область належить до маловодних регіонів України. Річкова мережа області представлена переважно середніми та малими річками, які мають переважно степовий режим водопостачання, зазнають значного антропогенного впливу та часто пересихають у літній період.

Головна річка області – Дніпро. Довжина в межах області: близько 230 км. Загальна довжина: 2201 км. Площа басейну: 504 000 км<sup>2</sup>. Особливості: є основною водною артерією області та України загалом. Використовується для

водопостачання, енергетики, рибальства, судноплавства та рекреації. На річці розташоване Каховське водосховище – одне з найбільших в Україні, яке забезпечує зрошення, промислове та побутове водопостачання. Внаслідок зарегульованості та антропогенного навантаження спостерігаються проблеми замулення, забруднення та евтрофікації вод.

Притоки Дніпра в межах Запорізької області. Річка Конка Довжина: 146 км. Площа басейну: 2580 км<sup>2</sup>. Має частково каналізоване русло, використовується для зрошення.

Річка Білозерка. Довжина: 84 км. Впадає в Каховське водосховище.

Малі річки, що впадають в Азовське море. Річка Молочна Довжина: 197 км. Площа басейну: 3450 км<sup>2</sup>. Впадає у Молочний лиман, використовується для зрошення. Зазнає значного забруднення та пересихання влітку.

Річка Берда. Довжина: 125 км. Площа басейну: 1750 км<sup>2</sup>. Має заплавні луки, багаті на флору і фауну.

Річка Обитічна. Довжина: 96 км. Площа басейну: 1350 км<sup>2</sup>. Формує Обитічну затоку Азовського моря, використовується для рибальства.

Інші річки та їхні особливості. Річка Кінська – має довжину 146 км, пересихає влітку, забруднена стічними водами. Річка Великий Утлюк – впадає в Утлюцький лиман Азовського моря. Річка Корсак – невелика степова річка, що піддається сезонному пересиханню.

Проблеми річкової мережі Запорізької області.

1. Пересихання малих річок через кліматичні зміни та зарегульованість.
2. Забруднення промисловими та сільськогосподарськими стоками (пестициди, важкі метали).
3. Засмічення водних об'єктів побутовими та промисловими відходами.
4. Зниження біорізноманіття водних екосистем через зміну гідрологічного режиму.

Річки Запорізької області відіграють важливу роль у водопостачанні, зрошенні та підтримці екологічного балансу. Однак вони зазнають значного антропогенного впливу, що потребує впровадження ефективних заходів з

охорони водних ресурсів, зменшення забруднення та екологічного моніторингу за допомогою сучасних технологій, включаючи дистанційне зондування Землі.

Запорізька область має різноманітні водні об'єкти, включаючи природні озера, лимани та штучні водосховища, які відіграють важливу роль у водопостачанні, енергетиці, сільському господарстві та екологічній рівновазі регіону.

#### Водосховища Запорізької області

Каховське водосховище. Розташування: Дніпро, південь області. Площа: близько 2155 км<sup>2</sup> Об'єм води: 18,2 км<sup>3</sup> Глибина: середня – 8,4 м, максимальна – 24 м Призначення: Водопостачання населених пунктів та промисловості; Гідроенергетика (Каховська ГЕС); Зрошення сільськогосподарських земель; Рибальство та рекреація. Екологічні проблеми: Замулення та цвітіння води через надмірний розвиток водоростей; Забруднення промисловими та сільськогосподарськими стоками; Втрата біорізноманіття через зміну гідрологічного режиму.

Дніпровське (Запорізьке) водосховище. Розташування: Дніпро, північ Запорізької області. Площа: близько 410 км<sup>2</sup>. Об'єм: 3,3 км<sup>3</sup>. Глибина: середня – 8 м, максимальна – 53 м. Призначення: Енергетика (Дніпровська ГЕС); Водопостачання: Рекреація та рибальство. Екологічні проблеми: Високий рівень забруднення через промислові стоки; Евтрофікація та зменшення популяцій риби; Зміна природного режиму річки Дніпро.

Малі водосховища та ставки. В області є понад 50 малих водосховищ та ставків, які використовуються для зрошення, рибного господарства та рекреації. Найбільші серед них – Молочанське, Веселівське та Верхньотерсянське водосховища.

#### Озера та лимани Запорізької області

Молочний лиман. Розташування: південний схід області, впадає в Азовське море. Площа: близько 170 км<sup>2</sup>. Глибина: середня – 1-2 м. Особливості: Солоне прибережне озеро. Важливий природний об'єкт, що має статус заповідника. Є місцем гніздування багатьох видів птахів. Проблеми:

пересихання та зменшення площі через обміління річки Молочної. Забруднення через сільськогосподарські стоки. Порушення екосистемного балансу

Утлюцький лиман. Розташування: південна частина області, біля Бердянська. Площа: близько 700 км<sup>2</sup>. Глибина: до 3 м. Особливості: важливий об'єкт для рибного господарства. Використовується для відпочинку та рекреації.

Солоні озера. Розташовані переважно в південній частині області. Найбільші – Гірка, Солоне, Велике Солоне. Використовуються в лікувальних цілях через високу концентрацію мінералів.

Проблеми водних об'єктів області. Пересихання озер та лиманів через зміну клімату та зарегульованість річок. Забруднення водою промисловими та сільськогосподарськими стоками. Евтрофікація водосховищ, викликана надмірним розвитком водоростей. Зменшення біорізноманіття через зміну екосистемних умов.

Озера та водосховища Запорізької області мають важливе значення для водопостачання, енергетики, сільського господарства та екології регіону. Водночас вони зазнають значного антропогенного навантаження та потребують заходів щодо збереження водних ресурсів, покращення якості води та екологічного моніторингу, включаючи використання методів дистанційного зондування Землі.

### **3.2 Побудова зображень водних об'єктів Запорізької області з використанням супутникових знімків**

Застосування супутникових технологій для спостереження за водними ресурсами забезпечує оперативне отримання якісних даних про стан водних об'єктів, що є ключовим для оцінки екологічної ситуації в регіоні. Для Запорізької області, яка відіграє важливу роль у водозабезпеченні та екосистемах України, супутниковий моніторинг став основним інструментом аналізу змін у водних ресурсах. Завдяки супутниковим знімкам можна

відстежувати динаміку рівня води, зміни площі водних об'єктів та інші важливі параметри гідросистем [29-32].

Окрім контролю рівня води, супутникові знімки дають змогу фіксувати зміни у площі водних об'єктів, зокрема озер, ставків та заболочених територій. Використовуючи оптичні супутникові дані, що відображають водні поверхні, можна аналізувати сезонні коливання водних площ, спричинені змінами клімату чи рівнем опадів.

Крім того, супутниковий моніторинг дає можливість оцінити ефективність природоохоронних заходів, таких як відновлення заболочених територій чи збереження природних водосховищ. Аналізуючи зміни у водних площах після реалізації екологічних ініціатив, можна визначити їхню результативність і подальшу необхідність коригування підходів до охорони водних ресурсів.

Ще однією важливою задачею є оцінка рівня забруднення водних ресурсів. Супутникові знімки дають змогу виявляти забруднені ділянки водоєм і визначати масштаби забруднення. Аналізуючи зміни у спектральних характеристиках води, можна ідентифікувати наявність різних забруднювачів, зокрема нафтових плям, важких металів або органічних речовин.

Для оцінки продуктивності шести алгоритмів було обрано територію Запорізької області. Після отримання сірих результатів, створених індексами водності, для створення карт бінарних класів води та безводних територій було застосовано поріг за замовчуванням 0, метод порогових значень Otsu та декілька порогових значень, визначених точками долини на гістограмі. Матриці плуганини були створені на основі тестових вибірок, отриманих методом стратифікованої випадкової вибірки. Зважений коефіцієнт  $\alpha$  визначався з ряду значень для досягнення найвищої загальної точності (OA) [29-32].

Ми протестували шість індексів: NDVI, NDWI, MNDWI, WRI, AWEI та WNDWI, використовуючи два знімки Landsat 5 TM, що охоплюють дві тестові ділянки. Спочатку ми використали поріг за замовчуванням 0 для сегментації сірих знімків на бінарні зображення з класами водних і неводних ділянок.

Із застосуванням зазначених коефіцієнтів з використанням відкритої ГІС-програми QGIS були отримані карти (рис. 4-9).

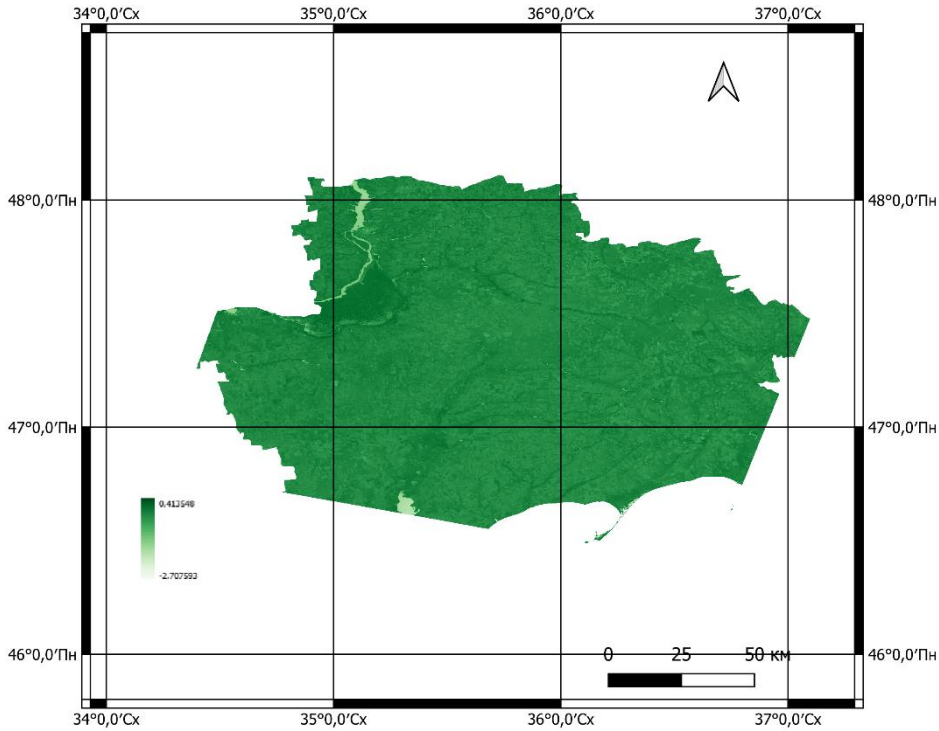


Рис. 4 Обчислення растрової поверхні за WRI

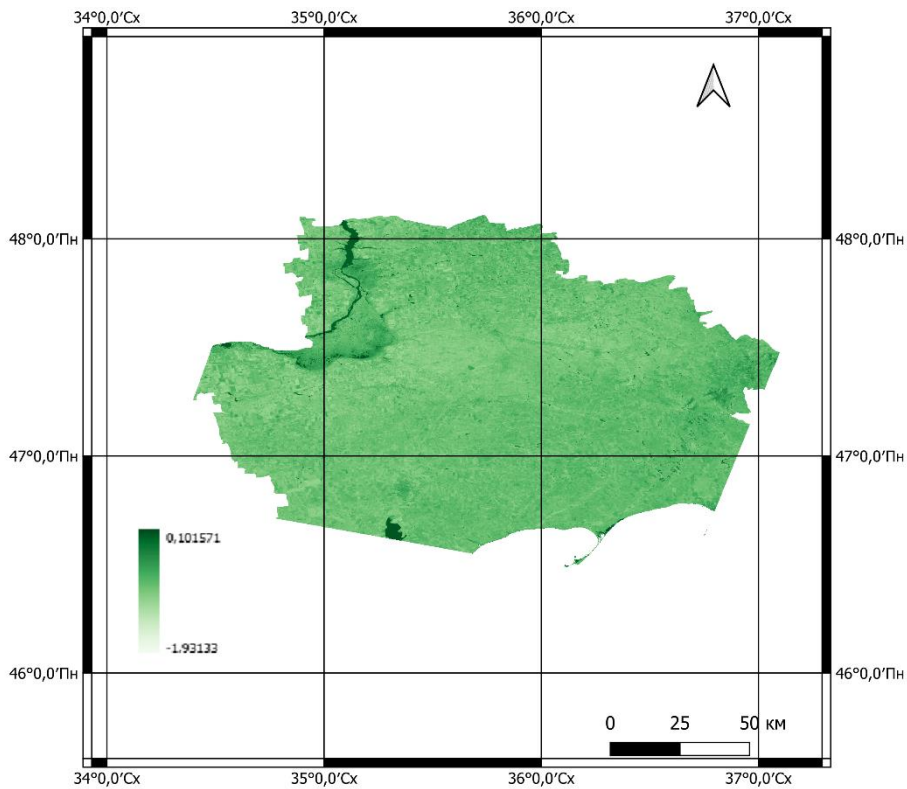


Рис. 5 Обчислення растрової поверхні за WNDWI

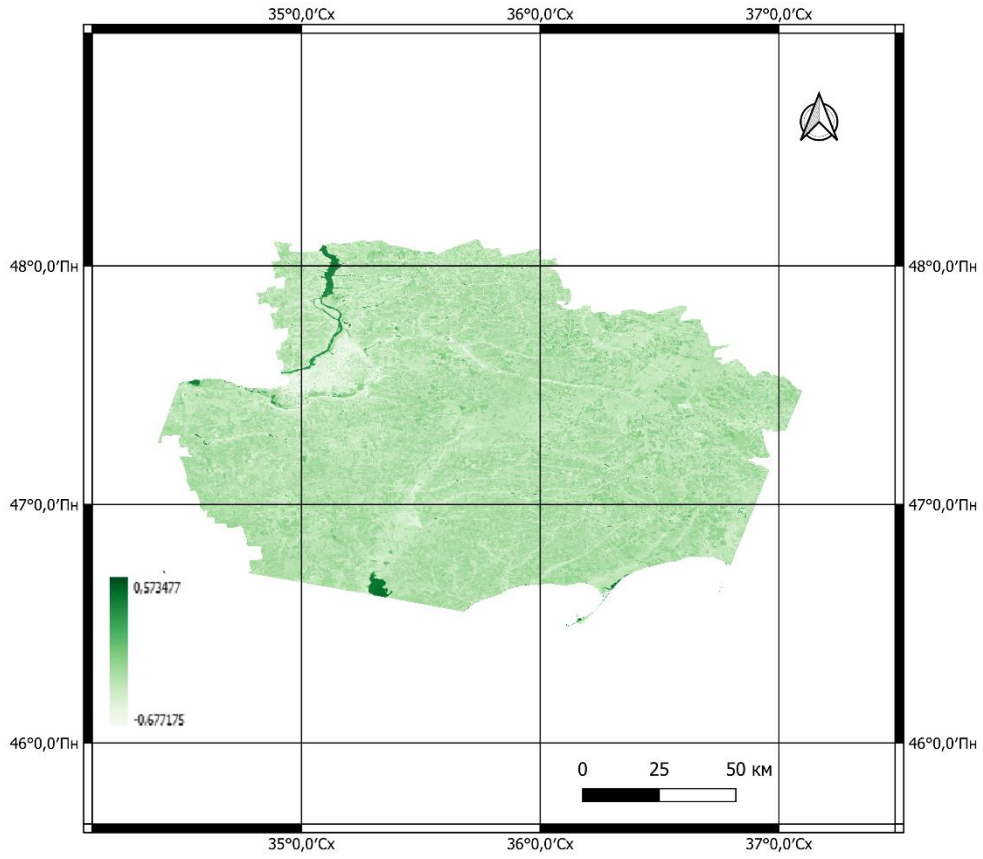


Рис. 6 Обчислення растрової поверхні за NDWI

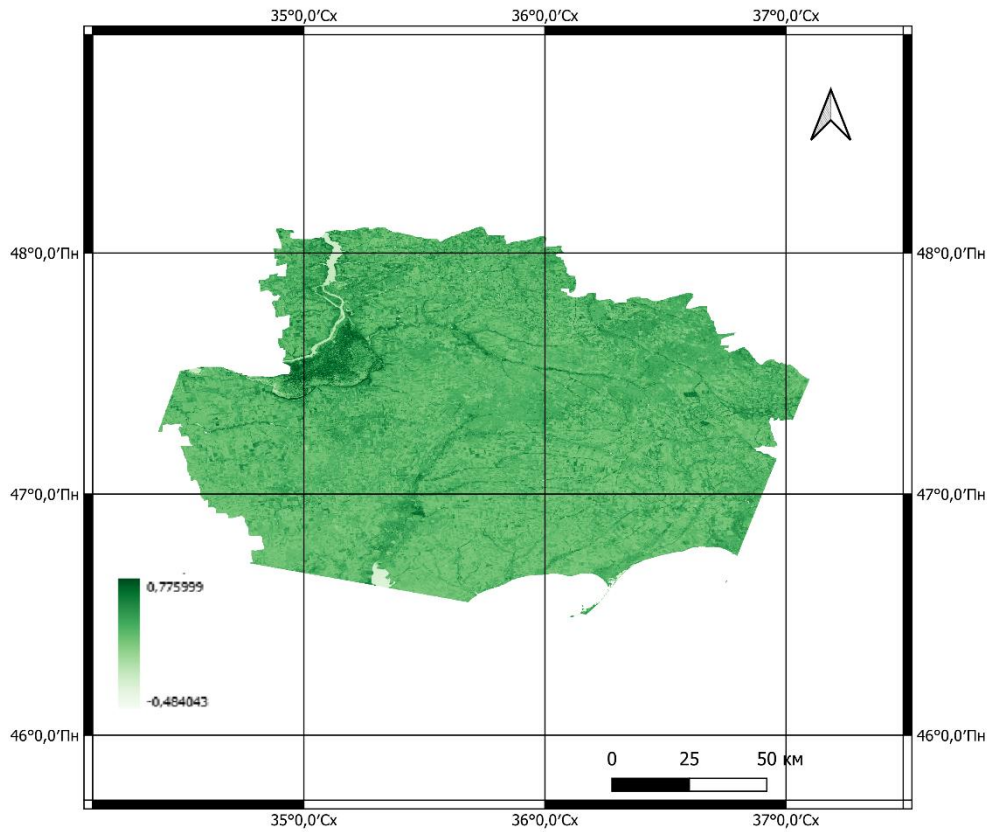


Рис. 7 Обчислення растрової поверхні за NDVI

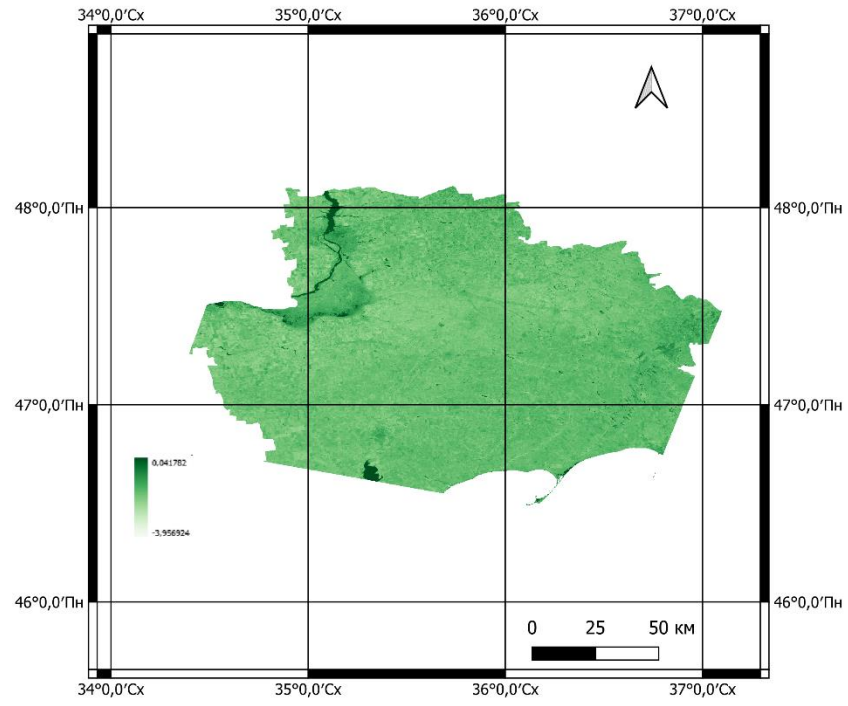


Рис. 8 Обчислення растрової поверхні за MNDWI

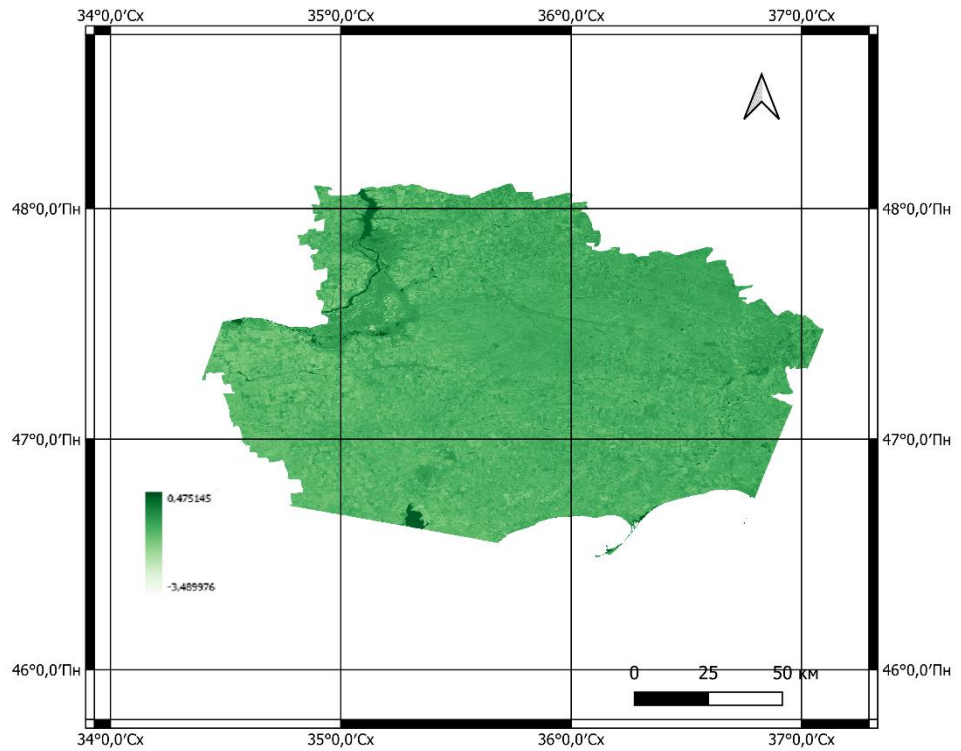


Рис. 8 Обчислення растрової поверхні за AWEI

Загалом спостерігається тенденція до скорочення площ водних об'єктів, що може бути спричинене різними факторами. Серед основних причин виділяють: 1) обміління або пересихання водойм; 2) розвиток водної рослинності чи значне забруднення.

Обміління та пересихання можуть бути наслідком як природних, так і антропогенних чинників. До природних належать кліматичні зміни, зокрема підвищення температури води. До антропогенних – забруднення водойм (замулення дна, заростання русла, порушення гідрологічного зв'язку між струмками та основними водними артеріями), надмірне використання води в аграрному секторі, вирубка лісів (оскільки прибережні дерева утримують вологу, яка надходить у водойми).

Кліматичні зміни також спричиняють нерівномірні опади, що призводять до вертикальної міграції поживних речовин, а посухи – до їх горизонтального переміщення, що додатково впливає на стан водних об'єктів.

На окремих ділянках, де раніше спостерігалися водні об'єкти, можна помітити низькі значення в синьому та червоному спектрах і високі – у зеленому. Це може свідчити про активний розвиток водної рослинності, зокрема гідатофітів.

«Цвітіння» води та надмірний ріст водної рослинності зазвичай є наслідком значного антропогенного впливу. Основними причинами такого явища є хімічне та бактеріальне забруднення, надмірне використання добрив, що містять фосфор і азот, витоки небезпечних речовин із несанкціонованих звалищ пестицидів, скидання неочищених стічних вод, побутове забруднення та неналежне поводження з органічними відходами, зокрема гноєм.

Крім того, сприяти розповсюдженню водоростей може уповільнення течії річок, як це спостерігається у руслі Дніпра, а також забудова заплавлених земель, що змінює природний водний баланс.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ В ГАЛУЗІ

Галузь дистанційного зондування Землі передбачає роботу з високотехнологічним обладнанням, програмним забезпеченням, польовими дослідженнями та обробкою великих масивів даних. У зв'язку з цим важливо забезпечити належний рівень охорони праці для запобігання професійним ризикам.

Основні ризики та заходи охорони праці

### 1. Робота з безпілотними літальними апаратами (БПЛА)

Ризики:

- Втрата керування дроном, зіткнення або падіння.
- Робота на відкритій місцевості, вплив погодних умов.
- Вплив електромагнітного випромінювання.

Заходи безпеки:

- Дотримання правил експлуатації БПЛА (сертифікація операторів, перевірка обладнання перед польотом).
- Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) для роботи на відкритій місцевості.
- Дотримання обмежень щодо роботи в зонах із високим рівнем електромагнітного випромінювання.

### 2. Робота в польових умовах

Ризики:

- Перебування у важкодоступній місцевості.
- Вплив природних факторів (сонячне випромінювання, низькі температури, опади).
- Контакт із потенційно небезпечними об'єктами (вибухонебезпечні матеріали, небезпечні тварини або рослини).

Заходи безпеки:

- Використання GPS-навігації, зв'язку та засобів першої допомоги.
- Носіння відповідного одягу та взуття.

- Попередня оцінка ризиків у конкретному регіоні.

### 3. Робота з лазерним обладнанням (лідар, спектрометри)

Ризики:

- Вплив лазерного випромінювання на зір.

- Неправильне використання обладнання, що може призвести до механічних пошкоджень.

Заходи безпеки:

- Використання захисних окулярів при роботі з лазерними системами.

- Проведення інструктажу з техніки безпеки.

### 4. Робота в офісі з ГІС і великими даними

Ризики:

- Тривале перебування за комп'ютером (перевтома, проблеми з поставою, зором).

- Робота з великими масивами даних, що може викликати стрес.

Заходи безпеки:

- Дотримання правил ергономіки (належна організація робочого місця, перерви для відпочинку очей і м'язів).

- Використання сучасного програмного забезпечення для оптимізації обробки даних.

Загальні заходи охорони праці

- Проведення інструктажів з безпеки праці перед початком робіт.

- Використання засобів індивідуального захисту відповідно до умов роботи.

- Дотримання норм радіаційної та електромагнітної безпеки.

- Наявність аварійного плану на випадок непередбачуваних ситуацій.

Дотримання заходів охорони праці в дистанційному зондуванні Землі є важливим для збереження здоров'я та безпеки фахівців, підвищення ефективності роботи та мінімізації ризиків у процесі збору й обробки геопросторових даних.

## ВИСНОВКИ

1. Супутниковий моніторинг є ефективним інструментом оцінки стану водних ресурсів, що дозволяє здійснювати оперативне та комплексне спостереження за їх динамікою, якістю та просторовими змінами. Завдяки дистанційному зондуванню Землі (ДЗЗ) можна отримувати актуальні дані про водойми, що особливо важливо для управління водними ресурсами та екологічного моніторингу.

2. Застосування нормалізованих диференційних індексів (NDWI, MNDWI, NDTI) дозволяє автоматизовано ідентифікувати водні об'єкти та оцінювати їх екологічний стан. Використання цих індексів у поєднанні з мультиспектральними супутниковими знімками підвищує точність аналізу та дозволяє виявляти зміни, спричинені природними та антропогенними факторами.

3. Основні джерела супутникових даних (Sentinel-2, Landsat-8) забезпечують широкий спектр можливостей для аналізу водних ресурсів, дозволяючи оцінювати якісні та кількісні характеристики водних об'єктів у різних часових масштабах. Використання даних із відкритих супутникових платформ робить моніторинг доступним для широкого кола дослідників та екологічних організацій.

4. Геоінформаційні технології (QGIS) є ключовими інструментами для обробки супутникових даних та їх інтерпретації. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє аналізувати великі масиви даних, створювати тематичні карти та моделювати зміни у водних екосистемах.

5. Запропоновані методики супутникового моніторингу можуть бути використані для оцінки екологічного стану водойм, управління водними ресурсами та запобігання забрудненню. Інтеграція супутникових даних у систему прийняття управлінських рішень дозволяє підвищити ефективність контролю за водними ресурсами, своєчасно реагувати на екологічні загрози та розробляти стратегії сталого водокористування.

6. Використання супутникових технологій є перспективним напрямом розвитку екологічного моніторингу, що дозволяє мінімізувати витрати на польові дослідження, підвищити точність оцінки водних ресурсів та забезпечити безперервний моніторинг змін у гідрологічних системах.

Результати дослідження можуть бути використані в екологічному менеджменті, водному господарстві, наукових дослідженнях та державному регулюванні для ефективного управління водними ресурсами та їх охорони.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/terrestrial-hydrosphere>
2. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
3. Офіційний сайт QGIS. URL: <https://qgis.org>
4. Офіційний сайт Геологічної служби США URL: <https://usgs.gov/>
5. Loveland, T.R., Cochrane, M.A., & Henebry, G.M. (2008). Landsat still contributing to environmental research. *Trends in ecology & evolution*, 23, 182-183
6. Lulla, K., Duane Nellis, M., & Rundquist, B. (2013). The Landsat 8 is ready for geospatial science and technology researchers and practitioners. *Geocarto International*, 28, 191-191
7. Roy, D.P., Wulder, M., Loveland, T., Woodcock, C., Allen, R., Anderson, M., Helder, D., Irons, J., Johnson, D., & Kennedy, R. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172
8. Verpoorter, C., Kutser, T., Seekell, D.A., & Tranvik, L.J. (2014). A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 41, 6396-6402
9. Liao, A., Chen, L., Chen, J., He, C., Cao, X., Chen, J., Peng, S., Sun, F., & Gong, P. (2014). High-resolution remote sensing mapping of global land water. *Science China Earth Sciences*, 57, 2305-2316
10. Plichko L., Zatserkovnyi V., Khilchevskyi V., Ilchenko A., Nikolaienko O. (2021). Using the Surface Algal Bloom Index to assess the ecological state of a small river in an urbanized area and the possibility of its revitalization. 20th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. European Association of Geoscientists and Engineers, Volume 2021, p.1 – 6. DOI 10.3997/2214-4609.20215521124
11. Plichko, L.V., Zatserkovnyi, V.I., Khilchevskyi, V.K. (2021). FAI definition in the water area of Svityaz based on satellite images as a preliminary study of the possible eutrophication of the lake. Proceedings 15th International Scientific

- Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. European Association of Geoscientists & Engineers, p. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.20215K2053 (in English).
12. Lacaux, J.P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J.A., Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sens. Environ.*, 106, 66–74 (in English).
  13. Wang, C., Chen, J., Wu, J., Tang, Y., Shi, P., Black, T.A., Zhu, K., 2017. A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 196, 1–12.
  14. Gonsamo, A., Chen, J.M., Price, D.T., Kurz, W.A., Wu, C., 2012. Land surface phenology from optical satellite measurement and CO<sub>2</sub> eddy covariance technique. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2005 – 2012, 117.
  15. Nagler, P., Daughtry, C., Goward, S., 2000. Plant litter and soil reflectance. *Remote Sens. Environ.* 71, 207 – 215.
  16. Rouse, J.W., Jr.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Washington, DC, USA, 10–14 December 1973.
  17. Tucker, C.J.; Miller, L.D.; Pearson, R.L. Measurement of the combined effect of green biomass, chlorophyll, and leaf water on canopy spectrorreflectance of the shortgrass prairie. *Remote Sens. Earth Resour.* **1973**, 1973, 2.
  18. RUNDQUIST, D., LAWSON, M., QUEEN, L. and CERVENY, R., 1987, The Relationship between the Timing of Summer-Season Rainfall Events and Lake-Surface Area. *Water Resources Bulletin*, 23, pp. 493–508.
  19. XU, Hanqiu, 2002, Spatial expansion of urban/town in Fuqing of China and its driving force analysis. *Remote Sensing Technology and Application*, 17, pp. 86–92
  20. YU, J., HUANG, Y. and FENG, X., 2001, Study on water bodies extraction and classification from SPOT image. *Journal of Remote Sensing*, 5, pp. 214–219

21. MCFEETERS, S.K., 1996, The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, pp. 1425–1432.
22. Xu, H. 2006. “Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery.” *International Journal of Remote Sensing* 27: 3025–3033. doi:10.1080/01431160600589179.
23. Ouma, Y. O., and R. Tateishi. 2006. “A Water Index for Rapid Mapping of Shoreline Changes of Five East African Rift Valley Lakes: An Empirical Analysis Using Landsat TM and ETM+ Data.” *International Journal of Remote Sensing* 27: 3153–3181. doi:10.1080/01431160500309934.
24. Ji, L., L. Zhang, and B. Wylie. 2009. “Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index.” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75: 1307–1317. doi:10.14358/PERS.75.11.1307.
25. Xu, H. 2006. “Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery.” *International Journal of Remote Sensing* 27: 3025–3033. doi:10.1080/01431160600589179.
26. Feyisa, G. L., H. Meilby, R. Fensholt, and S. R. Proud. 2014. “Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery.” *Remote Sensing of Environment* 140: 23–35. doi:10.1016/j.rse.2013.08.029.
27. Qiandong Guo, Ruiliang Pu, Jialin Li & Jun Cheng (2017) A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 38:19, 5430-5445, DOI: 10.1080/01431161.2017.1341667
28. Burachek, V.G. (2011). Effektivnost primeneniya subpikselnyih tehnologiy sinteza izobrazheniy ob'ektov dlya krupnomasshtabnoy aerokosmicheskoy s'ymki / V.G. Burachek, V.I. Zatserkovnyiy, V.Yu. Belenok. Chernigovskiy nauchnyiy elektronnyiy zhurnal ChGIEU. Seriya 2 “Tehnika i priroda”: elektronnyiy sbornik nauchnyih rabot. Chernigov: ChGIEU, 2011. No. 2 (2). P. 9–19.

29. Дистанційні дослідження Землі : Навчальний посібник / Галина Байрак, Богдан Муха. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – 712 с.
30. Дистанційне зондування Землі: аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах: навч.-метод. посіб. / С. О. Довгий, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма та ін. – Київ: Національний центр «Мала академія наук України», 2020. – 268 с.
31. Зацерковний В.І., Каревіна Н.П. Аерокосмічні дослідження Землі: історія розвитку: монографія. У 2-х томах – Київ: ТОВ «Юстон ЛТД», Т1 2014. – 302 с.; Т2 2015. – 405 с.
32. Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування: навч. посіб. / С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, Л. Я. Юрків. — К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. — 316 с.