

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Кафедра геології та екології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи
за ступенем вищої освіти «Магістр»
зі спеціальності 103 Науки про Землю ОПП Геологія

Тема роботи
«ДИНАМІКА СТАНУ КАРАЧУНІВСЬКОГО ТА КРЕСІВСЬКОГО
ВОДОСХОВИЩ ЗА ОСТАННІ П'ЯТЬ РОКІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ
В МЕЖАХ КРИВОРІЗЬКОГО РАЙОНУ»

Виконав магістрант групи НЗГ-24-1м

Ярослав ВОРОНЧУК

Науковий керівник

Віталій ХАРИТОНОВ

Нормоконтролер

Олександр ТРУНІН

В.о. завідувача кафедри

Світлана ПАНОВА

Кривий Ріг
2025

Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра геології та екології
Другий (магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність: 103 Науки про Землю ОПП Геологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри _____ Світлана ПАНОВА
«_____» _____ 20____ р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну (магістерську) роботу
Ворончука Ярослава Валерійовича

1. Тема: «Динаміка стану Карачунівського та Кресівського водосховищ за останні п'ять років на основі даних ДЗЗ в межах Криворізького району». Затверджена наказом по КНУ № 206с від «10» квітня 2025 р.
2. Термін подання студентом закінченої роботи: «25» листопада 2025 р.
3. Вихідні дані по кваліфікаційній магістерській роботі: фондові та опубліковані матеріали; 3622 значень аерозольного індексу, 2774 хмарної щільності, 246 значень NDVI, 318 значень NDWI над акваторіями Кресівського і Карачунівського водосховищ, які були вивантажені з бази космічних знімків і дистанційного зондування Землі Copernicus Browser, отриманих місіями Sentinel-2 і Sentinel-5P (TROPOMI).
4. Зміст пояснювальної записки:
 - реферат;
 - зміст;
 - вступ;
 - коротка геологічна характеристика регіону;
 - загальні відомості про об'єкти досліджень;
 - фактичний матеріал та методи досліджень;
 - динаміка стану Карачунівського та Кресівського водосховищ за останні п'ять років на основі даних ДЗЗ в межах Криворізького району;
 - висновки;
 - література;
 - додатки.

5. Перелік графічного матеріалу.

Аркуш 1. Оглядова схема Криворізького району.

Аркуш 2. Оглядова схема положення Карачунівського і Кресівського водосховищ.

Аркуш 3. Схема вивантаження значень аерозольного індексу (AI), NDVI та NDWI над акваторіями Карачунівського водосховища

Аркуш 4. Схема вивантаження значень аерозольного індексу (AI), NDVI та NDWI над акваторіями Кресівського водосховища

Аркуш 5. Діаграма коливань середньорічних (медіана) і сезонних значень AI.

Аркуш 6. Діаграма коливань середньорічних (медіана) і сезонних значень NDVI.

Аркуш 7. Діаграма коливань середньорічних (медіана) і сезонних значень NDWI.

.

6. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	док. геол. н. професор Анатолій БЕРЕЗОВСЬКИЙ	12.04.25	23.05.25
2	канд. геол. н. доцент Віталій ХАРИТОНОВ	26.05.25	25.06.25
3	канд. геол. н. доцент Віталій ХАРИТОНОВ	26.06.25	04.09.25
4	канд. геол. н. доцент Віталій ХАРИТОНОВ	05.09.25	03.11.25

7. Календарний план:

Етапи роботи	Термін виконання
1. Аналіз інформаційних джерел	12.04.25 – 12.05.25
2. Складання короткого нариску про геологічну будову Криворіжжя	13.05.24 – 23.05.25
3. Складання короткого опису об'єктів досліджень	24.05.25 – 27.06.25
4. Вивантаження даних аерозольного індексу і хмарної щільності	28.06.25 – 28.07.25
5. Статистична обробка отриманої інформації про AI,	29.07.25 – 29.08.25

узагальнення даних	
6. Підготовка статті на Міжнародну конференцію	30.08.25 – 30.09.25
7. Вивантаження значень NDVI та NDWI, їх статистична обробка отриманої інформації про AI, узагальнення даних	01.10.24 – 02.11.24
8. Оформлення списку літератури, графічного матеріалу і додатків	03.11.25 – 25.11.25

Дата видачі завдання «12» квітня 2025 р.

Завдання видав
науковий керівник

Віталій ХАРИТОНОВ

Завдання отримав
магістрант

Ярослав ВОРОНЧУК

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна (магістерська) робота: 77 с., 19 рис., 11 табл., 58 інформаційних джерел, 8 додатків.

Об'єкти дослідження – Карачунівське та Кресівське водосховища в межах Криворізького району.

Предмет дослідження – динаміка гідроекологічного стану зазначених водосховищ за період 2020-2025 рр. за супутниковими даними.

В основу роботи покладені: фондові та опубліковані матеріали 3622 значень аерозольного індексу, 2774 хмарної щільності, 246 значень NDVI, 318 значень NDWI над акваторіями Кресівського і Карачунівського водосховищ, які були вивантажені з бази космічних знімків і дистанційного зондування Землі Copernicus Browser, отриманих місіями Sentinel-2 і Sentinel-5P (TROPOMI).

У першому розділі міститься коротка інформація про географо-геологічну характеристику Криворізького району, в межах якого облаштовані Карачунівське та Кресівське водосховища. Основну увагу приділено геології Криворізького структури і пов'язаному з нею однойменному басейну. Саме розробка його родовищ посилює негативний вплив на водосховища на додаток до глобальних кліматичних змін, глобального пилового забруднення, посилення парникового ефекту.

Другий розділ містить загальну інформацію про Карачунівське та Кресівське водосховища, особливо акцентує увагу на їх значення як джерела водопостачання м. Кривого Рогу, а також як об'єктів рекреаційного характеру.

У третьому розділі представлений опис фактичного матеріалу, який було використано для проведення досліджень, результати яких містяться пояснювальній записці кваліфікаційної роботи.

Четвертий розділ присвячено загальній, річній та сезонній динаміці значень AI, NDVI, NDWI. Встановлено, що обидва водосховища потребують інтегрованого управління водними ресурсами через високий рівень антропогенного та геоекологічного впливу. Карачунівське водосховище, як джерело питної води, демонструє кращий, але вразливий екологічний стан, тоді як Кресівське водосховище є більш мінливим та чутливим до локальних промислових факторів. Методи ГІС та ДЗЗ підтверджують достовірність цих висновків і є необхідним інструментом для оперативного моніторингу та вжиття заходів щодо запобігання подальшому погіршенню якості води.

Ключові слова: геоінформаційні системи, дистанційне зондування Землі, аерозольний індекс, NDVI, NDWI, Кресівське водосховище, Карачунівське водосховище, водні об'єкти, геологічне середовище, Криворізький залізорудний басейн, Криворізький район.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	7
1. КОРОТКА ГЕОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГІОНУ.....	10
1.1. Економіко-географічні відомості.....	10
1.2. Історія геологічної вивченості.....	13
1.3. Історія геологічного розвитку.....	15
1.4. Корисні копалини.....	20
Висновки за розділом 1.....	21
2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
2.1. Карачунівське водосховище.....	23
2.2. Кресівське водосховище.....	28
Висновки за розділом 2.....	32
3. ФАКТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	33
Висновки за розділом 3.....	40
4. ДИНАМІКА СТАНУ КАРАЧУНІВСЬКОГО ТА КРЕСІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩ ЗА ОСТАННІ П'ЯТЬ РОКІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ В МЕЖАХ КРИВОРІЗЬКОГО РАЙОНУ.....	41
4.1 Огляд фондових і опублікованих даних за темою роботи.....	41
4.2. Динаміка значень аерозольного індексу (AI).....	46
4.3. Динаміка значень нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI).....	51
4.4. Динаміка значень нормалізованого диференційного індексу вологості (NDWI).....	55
Висновки за розділом 4.....	59
ВИСНОВКИ.....	62
ЛІТЕРАТУРА.....	64
ДОДАТКИ.....	69
ДОДАТОК А.....	70
ДОДАТОК Б.....	71
ДОДАТОК В.....	72
ДОДАТОК Г.....	73
ДОДАТОК Д.....	74
ДОДАТОК Е.....	75
ДОДАТОК Ж.....	76
ДОДАТОК З.....	77

ВСТУП

Водні ресурси є одними з ключових елементів природного середовища, що визначають соціально-економічний розвиток регіонів та рівень їх екологічної безпеки. Особливої ваги ця проблема набуває для промислових територій, серед яких Криворізький район Дніпропетровської області посідає одне з провідних місць за рівнем антропогенного навантаження. Тут водні об'єкти виконують багатофункціональну роль: забезпечують питне та технічне водопостачання, слугують рекреаційними зонами, підтримують біорізноманіття та екологічну стійкість ландшафтів.

До найбільших водних об'єктів району належать Карачунівське та Кресівське водосховища. Вони є стратегічними елементами водогосподарського комплексу регіону, проте зазнають значного впливу як природних, так і антропогенних чинників. Серед основних проблем – коливання рівня води, евтрофікація, замулення, забруднення промисловими та побутовими стоками, а також наслідки кліматичних змін. У зв'язку з цим виникає потреба в постійному моніторингу стану цих водосховищ.

Традиційні методи гідрометричних спостережень є інформативними, але обмеженими у просторі та часі. Сучасні технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надають нові можливості для комплексної оцінки стану водойм. Використання супутникових даних (Sentinel-2, Sentinel-5P) дає змогу простежити просторово-часову динаміку площі водного дзеркала, якості води та інших параметрів із високою точністю та регулярністю.

Об'єкт дослідження – Карачунівське та Кресівське водосховища в межах Криворізького району.

Предмет дослідження – динаміка гідроекологічного стану зазначених водосховищ за період 2020-2025 рр. за супутниковими даними.

Мета роботи – оцінка змін стану Карачунівського та Кресівського водосховищ впродовж останніх п'яти років на основі аналізу даних ГІС та ДЗЗ.

Завдання дослідження.

1. Аналіз інформаційних джерел стосовно об'єкту і предмету дослідження.
2. Збір доступних даних дистанційного зондування Землі та супутникових знімків оптимальної якості території з об'єктом досліджень.
3. Визначити зміни площі водного дзеркала та рівня замулення.
4. Оцінити динаміку індексів якості води (NDWI, NDVI, AI).

5. Виявити сезонні та середньорічні закономірності зміни показників.
6. Узагальнити екологічні наслідки виявлених змін.
7. Скласти рекомендації щодо подальших шляхів моніторингу в межах території розташування об'єкту досліджень.

Фактичний матеріал та методика. У дослідженні використано супутникові знімки Sentinel-2 та Sentinel-5P за період 2020-2025 рр., відкриті бази даних Copernicus Open Access Hub. Для аналізу стану водойм використовувалися індекси: NDWI – для визначення площі водного дзеркала; NDVI – для аналізу рослинності прибережної зони і цвітіння водойм; AER AI – аерозольний індекс атмосфери над водоймами. Обробка даних здійснювалася з використанням модуля «Аналіз даних» Ehel.

Методика передбачала попередню корекцію зображень, маскування хмарності, формування часових композитів та статистичний аналіз змін у динаміці.

Основні результати роботи.

1. Карачунівське водосховище демонструє чистіший середньорічний режим, що, ймовірно, пов'язано з його більшою віддаленістю від основних промислових об'єктів міста. Над Карачунівським водосховищем спостерігається чіткіший тренд до очищення атмосфери у 2024/2025 рр. (зниження піку забруднення 2021/2022 рр. майже вдвічі). Над Кресівським якість повітря залишається стабільно помірною. Максимальний рівень забруднення характерний для зимового та осіннього періодів (опалювальний сезон, метеорологічні умови), мінімальний – для літнього.

2. Просторово-часова динаміка вегетаційного індексу (NDVI) та водного індексу (NDWI) підкреслює суттєві відмінності в екологічному режимі водосховищ. Вегетаційний індекс в межах Карачунівського водосховища характеризується стабільно від'ємними значеннями та вузькими діапазонами. Це свідчить про чистішу, глибшу водну товщу та мінімальний розвиток макрофітів (стабільніший екологічний стан, менша схильність до цвітіння). Кресівське водосховище має ширші діапазони та частіші позитивні значення NDVI, що відображає наявність значних мілководних ділянок, вищу біологічну продуктивність та більшу мутність води (вища мінливість показників через урбанізаційний вплив).

3. Водний індекс (NDWI) в межах Карачунівського водосховища демонструє стабільно високі значення (медіана 0,28) з мінімальними коливаннями, що вказує на сталий рівневий режим і домінування відкритої водної поверхні. Кресівське водосховище характеризується значною варіативністю NDWI (медіана 0,20), що свідчить про активні сезонні коливання водності, чутливість до гідрологічних змін та більшу частку мілководдя.

4. Загалом результати дослідження демонструють, що Карачунівське водосховище перебуває у більш стабільному гідроекологічному стані, з меншими проявами цвітіння води та нижчим рівнем варіабельності спектральних показників. Натомість Кресівське

водосховище характеризується вищою динамічністю та тенденцією до збільшення інтенсивності цвітіння, що може бути індикатором зростаючого антропогенного навантаження та екологічних ризиків.

5. Обидва водосховища потребують інтегрованого управління водними ресурсами через високий рівень антропогенного та геоекологічного впливу. Карачунівське водосховище, як джерело питної води, демонструє кращий, але вразливий екологічний стан, тоді як Кресівське водосховище є більш мінливим та чутливим до локальних промислових факторів.

Результати досліджень автора оприлюднені на III Міжнародній науково-практичній конференції «International experience in scientific research» (23-25 жовтня, 2025, м. Чикаго, США – Додаток А).

Наукова новизна. Дослідження є першим комплексним аналізом стану Карачунівського та Кресівського водосховищ за даними ДЗЗ у 2020-2025 рр. для Криворізького району, що дозволило поєднати супутникові індекси з екологічними характеристиками водойм.

Практичне значення. Отримані результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування та природоохоронними структурами для моніторингу водних ресурсів, планування заходів з охорони довкілля та оптимізації водокористування.

Подальші напрямки досліджень автора роботи.

1. Інтеграція супутникових даних із наземними гідрометричними спостереженнями.
2. Розширення часових меж аналізу (ретроспективний моніторинг за архівними більш давніми знімками).
3. Використання машинного навчання для прогнозування змін стану водойм.
4. Оцінка впливу промислового навантаження на гідроекологічний стан водосховищ.

Подяки. Автор висловлює вдячність науковому керівнику за методичні консультації доценту кафедри геології та екології Криворізького національного університету кандидату геологічних наук доценту Віталію Миколайовичу Харитонову, а також розробникам відкритого міжнародного супутникового сервісу Copernicus **Browser** за доступ до даних, що лягли в основу кваліфікаційної роботи магістра.

1. КОРОТКА ГЕОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГІОНУ

1.1. Економіко-географічні відомості

Карачунівське і Кресівське водосховища розташовані в межах Криворізького району. Адміністративно він входить до складу Дніпропетровської області України (рис. 1.1). Територіально охоплює об'єднані землі ліквідованих Криворізького, Широківського, Софіївського і Апостолівського районів. На поточний момент до складу району входять 3 міські, 2 селищні і 10 сільських територіальних громад. Адміністративним центром є місто Кривий Ріг. Площа території району нараховує 5724,9 км². Чисельність населення району 764916 осіб [45].



Рис. 1.1 – Положення Криворізького району в межах Дніпропетровської області [46].

У орографічному відношенні територія району є горбистою степовою рівниною, значення ізогіпс коливаються від 50 до 200 м. Рельєф характеризується значною розчленованістю, що обумовлено розвитком річкових долин та балок, схили яких порізані водоріями та ярами. Їх ширина місцями сягає 50 м; глибина коливається від 1 до 10 м.

Головними водними артеріями в районі є річки Інгулець і Саксагань, на яких створено декілька водосховищ. Найбільшими серед них є Іскрівське та Карачунівське на річці Інгулець, а також Макортівське і Кресівське на річці Саксагань. У південній і центральній частинах району для водопостачання міста Кривий Ріг прокладено канал Дніпро-Кривий Ріг.

Клімат у Криворізькому районі є вологим континентальним. Середня температура становить -5°C узимку та $+18^{\circ}\text{C}$ у літній період. Річна амплітуда температур представлена діапазоном від $+13,7^{\circ}\text{C}$ до $+4,5^{\circ}\text{C}$, а середньорічна – дорівнює округлено $+9^{\circ}\text{C}$. Найтеплішим місяцем є липень (середнє максимальне значення температури $+27,8^{\circ}\text{C}$). Найхолоднішим – січень ($-6,3^{\circ}\text{C}$). Впродовж року переважають північні, північно-західні й північно-східні вітри зі швидкістю 3-4 м/с, іноді до 15 м/с.

Рослинний покрив в межах району є бідним. Природна степова рослинність збереглася лише на схилах долин річок і великих балок; решта території розорана. Лісові масиви майже відсутні, проте у верхів'ях балок та на схилах долин трапляються невеликі гаї. Поміж полів поширені захисні лісосмуги. Переважають акація, клен, тополя, дуб і ясен. У безпосередній близькості до населених пунктів значні площі зайняті садами з плодовими деревами – яблуня, груша, вишня, черешня, абрикос, слива.

Геоморфологічна будова району обумовлює достатній рівень відслоненості кайнозойських покладів в ярах та річкових долинах. Кристалічні породи фундаменту часто виходять на денну поверхню, по берегах великих річок. Проте частина осадових товщ затоплена водосховищами.

Транспортна мережа району є добре розвиненою. Основні залізничні лінії, що з'єднують Кривий Ріг із вузловими станціями П'ятихатки, Знам'янка, Запоріжжя, Верхівцеве, Кам'янське і Дніпро. Шляхи є двоколійними та електрифікованими. Автомобільні дороги державного значення мають ширину проїжджої частини 6-8 м і полотна 10-14 м. Забезпечують сполучення Кривого Рогу з Дніпром та іншими обласними центрами країни. Дороги місцевого значення здебільшого мають асфальтове або щебенеve покриття; сільські населені пункти сполучені асфальтованими й покращеними ґрунтовими дорогами.

Економічна структура району формується переважно гірничодобувною, металургійною, машинобудівною, будівельною, харчовою промисловістю та сільським господарством. Основу мінерально-сировинної бази Кривбасу становлять залізні руди кристалічних утворень докембрійського віку. У межах осадового чохла розробляються також поклади будівельних матеріалів.

Ключовою геологічною структурою в районі є Криворізька. З нею пов'язаний однойменний басейн, який займає площу 500-600 км². До його складу поєднані понад два десятки родовищ бідних і багатих залізних руд, які згруповані у чотири райони (з півночі на південь) – Північний, Саксаганський (Центральний), Південний та Інгулецький (рис. 1.2). Видобуток сировини для вилучення заліза ведеться понад 100 років.

Розвинута промислова інфраструктура дозволила визнати район як специфічний Криворізький гірничодобувний регіон (ГДР).

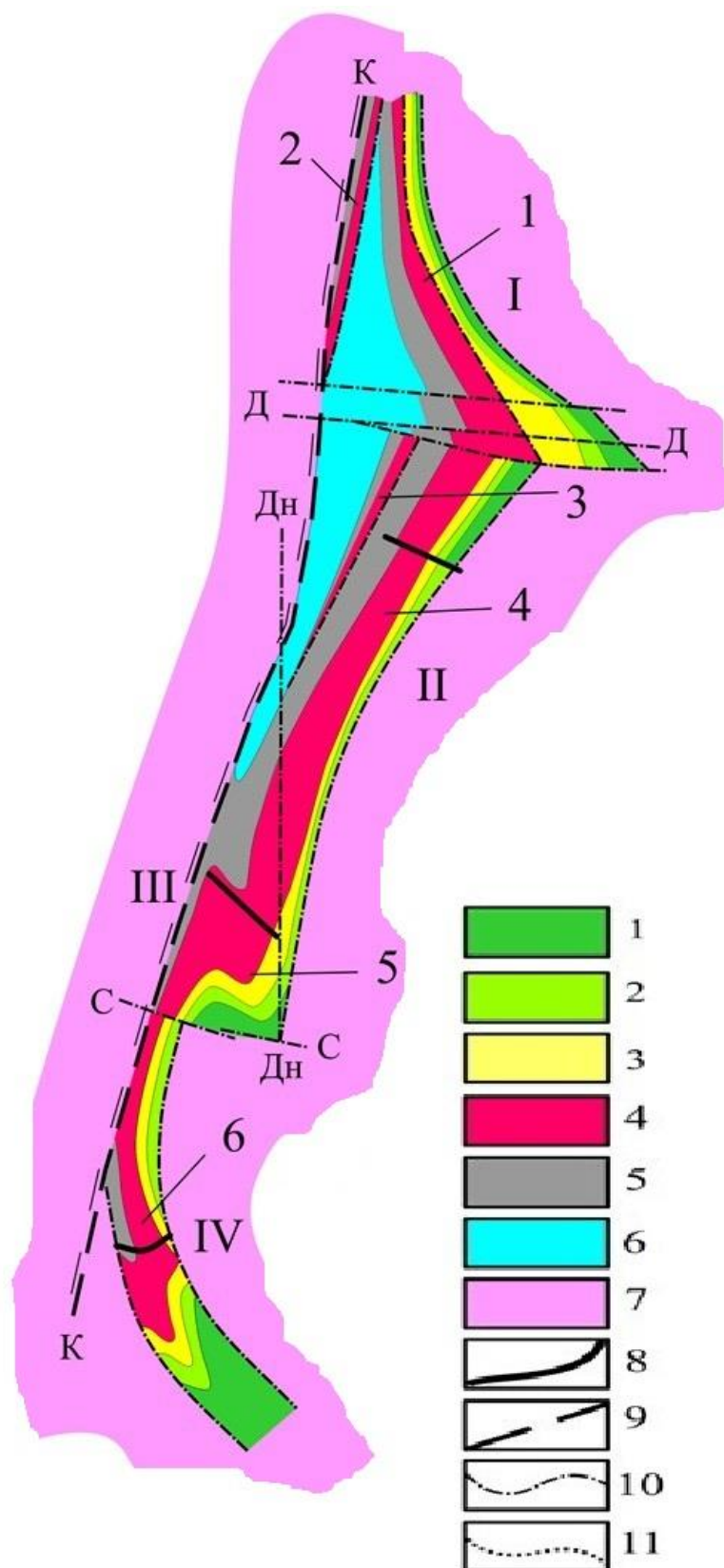


Рис. 1.2 – Геологічна схема Криворізької структури [40] зі змінами.

Продовження підпису до рис. 1.2

1 – метакластоліти та метабазити новокриворізької світи; 2 – амфіболіти та метакластоліти конкської серії; 3 – метакластоліти та метаультрабазити (талькові сланці) скелюватської світи; 4 – залізисті кварцити та сланці саксаганської світи; 5 – метакластоліти та доломітові мармури гданцівської світи; 6 – метакластоліти глеюватської світи; 7 – гранітоїди дніпропетровського комплексу; 8 – дайки діабазів; 9 – глибинні розломи мантійного закладення; 10 – глибинні розломи корового закладення; 11 – стратиграфічні контакти товщ.

Залізорудні райони: I – Північний (Ганнівський); II – Центральний (Саксаганський); III – Південний; IV – Інгулецький (Лихманівський).

Залізорудні смуги: 1 – Східно-Ганнівська; 2 – Західно-Ганнівська; 3 – Дальні Західні смуги; 4 – Саксаганська; 5 – ділянка замикання Криворізького синклінорю; 6 – Лихманівська.

Розломи; К-К – Криворізько-Кременчуцький; Д-Д – Девладівський; Дн-Дн – Діагональний; С-С – Скелюватська зона розломів.

1.2. Історія геологічної вивченості

Початком систематичного вивчення залізорудних проявів у межах Криворіжжя вважають записи Василя Зуєва, у яких уперше згадано про так званий залізний шифер. Його спостереження стали важливим поштовхом до подальших наукових досліджень у регіоні.

Наступним етапом розвитку вишукувань залізорудних родовищ басейну стала діяльність Олександра Поля – видатного громадського діяча та підприємця. Саме його наполегливість та ініціатива сприяли початку промислової розробки залізних руд у Кривому Розі. Роботи в гірничих виробках дали змогу максимально наблизитися до розкриття геологічної будови земних надр цього унікального регіону.

Першою науковою працею, присвяченою стратиграфії криворізької структури, стала опублікована в 1880 році трикомпонентна схема поділу товщі порід криворізької серії (автором був Станіслав Конткевич).

Кінець XIX століття позначився активними геологічними роботами під керівництвом Валеріана Домгера, Порфирія П'ятницького та Олександра Михальського. Їхні дослідження стали логічним продовженням попередніх спостережень і суттєво розширили уявлення про геологічну будову Криворіжжя та його мінерально-сировинний потенціал.

Упродовж першої половини XX століття дослідження Криворізького залізорудного басейну здійснювали такі вчені, як Йосип Ісаакович Танатар, Микола Гнатович Світальський, Едуард Карлович Фукс, Юлія Іринархівна Половинкіна, Павло Михайлович Каніболоцький, Яків Миколайович

Белєвцев, Леонід Олександрович Мартиненко, Юрій Петрович Гершойг та багато інших.

У їхніх наукових працях було ґрунтовно розглянуто питання стратиграфії криворізьких товщ, особливостей тектонічної будови та мінерального складу порід. Значну увагу вчені приділили також вивченню генетичних аспектів формування потужних скупчень залізних руд.

Упродовж 1955-60 рр. було оброблено і видано карту на основі робіт геологічної зйомки М 1:50000, які було виконано в межах Криворіжжя перед II Світовою війною.

Інтенсивна розробка Криворізьких родовищ у повоєнний період сприяла накопиченню значного фактичного матеріалу щодо будови та складу залізгорудних і вміщуючих товщ. Узагальнення отриманих даних здійснювали співробітники наукових установ НАН України та Кривого Рогу – Яків Миколайович Белєвцев, Микола Петрович Семененко та Георгій Іванович Каляєв. Одним із важливих досягнень цього етапу вивчення Криворізької структури стала розробка схеми її стратиграфічного поділу.

Також свій вагомий внесок в дослідження Кривбасу зробили М.І.Черновський, Л.С.Білокрис, Б.І.Пирогов, В.М.Трощенко, А.І.Каталенець, О.Т.Глушницький, В.Д.Євтехов, Д.М.Кондратьєва, В.Я.Легедза та інші.

Упродовж 1980-1990-х років у межах Криворізького залізгорудного басейну групою співробітників Львівського національного університету імені Івана Франка у складі В.Д.Коля, І.С.Паранька, А.І.Росихіної, А.О.Сіворонова та Г.М. Яценка було проведено комплексні геолого-формаційні дослідження.

Детальні відомості про окремі мінерали, породи та процеси мінерало- та петро-літогенезу висвітлено у численних публікаціях Юрія Гершойга, Леоніда Мартиненко, Юрія Мельника, Володимира Павлишина, Бориса Пирогова, Владлена Трощенко, Юрія Галабурди, Юрія Грицяя, Валентина Дмитрієва, Валерія Євтехова, Діани Кондратьєвої, Владислава Іванченка та багатьох інших дослідників [38].

На межі тисячоліть в Україні було активізовано геологічні роботи на вивчення родовищ і проявів корисних копалин, супутніх залізгорудній сировині Криворізького басейну. Дослідження були спрямовані на вивчення точок мінералізації скандію, ванадію, цирконію, ітрію, титану, германію, золота, а також скупченням технічних гранатів, декоративної, гемологічної та колекційної сировини, мінеральних пігментів, пісків, суглинків та інших корисних копалин: роботи В.Д.Євтехова, В.Легедзи, Р.Меддахи, В.В.М.Харитонова, В.В.Стеценка, Г.Я.Смірної, Л.М.Ковальчук, О.Ламрані, А.В.Євтехової та ін. [4, 5, 9, 12, 13, 17, 36, 38].

Дослідження геології Криворіжжя продовжилися у нульові та десяти роки. Свій внесок в дослідження Кривбасу зробили: В.Д.Євтехов, А.А.Березовський, І.С.Паранько, О.В.Плотніков, Ю.П.Мечніков, В.В.Іванченко, В.В.Стеценка, О.М.Трунін, Є.В.Євтехов, В.М.Харитонов, Е.О.Беспояско, С.В.Тіхлівець, В.В.Філенко та багато інших [2, 3, 6, 8, 14, 21, 31].

Проведені за останні 5 років геологічні дослідження були спрямовані на вирішення низки питань ресурсного забезпечення України, екологічної безпеки та регіональної мінералогії [7, 15, 18, 35, 36].

1.3. Історія геологічного розвитку

Сучасні уявлення про геологічну будову Криворізького залізорудного басейну сформувалися внаслідок багаторічних досліджень, що тривали майже два століття. За результатами комплексного вивчення встановлено, що територія розташування басейну характеризується трьохповерховою геологічною будовою, яка відображає тривалу і складну історію його геологічного розвитку (рис. 1.3).

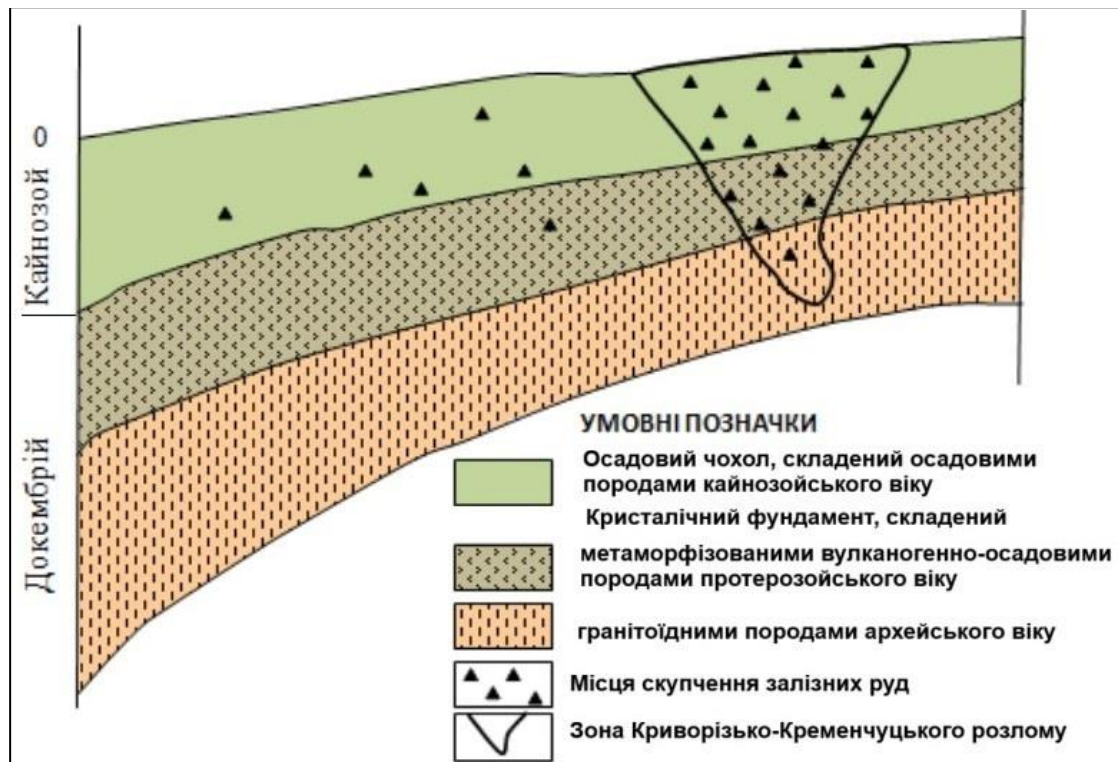


Рис. 1.3 – Геологічна схема будови території Криворізького району (на основі схеми Криворізької ландшафтно-технічної системи за [10] зі змінами автора).

Нижній структурний поверх утворений кристалічними породами архейського та протерозойського віку. До архейського комплексу належать граніти, гнейси та мігматити, що формують фундамент Криворізької структури. Вище залягають утворення криворізької серії протерозою, яка представлена переважно метаморфізованими товщами залізистих кварцитів, багатих залізних руд, сланців, пісковиків, конгломератів і амфіболітів. Ці

породи є головним рудоносним комплексом басейну та становлять основний промисловий інтерес, зумовлюючи його всесвітнє значення як одного з найбільших центрів залізорудного виробництва.

Верхній поверх охоплює осадові утворення кайнозойського віку (палеоген, неоген, четвертинний період). Перекриває давні метаморфічні породи відкладами осадового походження, які формувалися в умовах тривалої денудації порід суходолу та осадонакопичення мобілізованого матеріалу. До складу осадового чохла входять уламково-осадові породи — гравеліти, пісковики, доломіти, вапняки та глини, що утворювалися в різних фаціальних умовах від континентальних до морських. Також присутні хемогенно- та біохемогенно-осадові породи. До перших належать мергелі, марганцеві породи, бурі залізники, боксити, доломіти. До других — буре вугілля, вапняки. Завершує вертикальний розріз території товща четвертинних відкладів, що представлена лесоподібними суглинками, делювіальними й еоловими утвореннями, які перекриті сучасними ґрунтами, зокрема чорноземами [44].

Архейський етап розвитку Криворізької структури є найдавнішим і фундаментальним періодом її становлення. Саме в цей час відбулося формування кристалічної основи, яка згодом стала місцем накопичення потужних товщ протерозойських осадово-метаморфічних порід, зокрема залізорудоносних утворень криворізької серії.

Початок розвитку структури датують середнім археєм (3,4-3,2 млрд р. тому), коли в межах Придніпровського блока Українського щита (УЩ) відбулося розтріскування первинної протокори. У результаті опускання окремих блоків кори по розломах виникли рифтоподібні структури, між якими височили граніто-гнейсовими куполи. Останні представлені реліктами у вигляді гранітоїдів дніпропетровського комплексу, що складають значну частину Придніпровського блока УЩ. На Криворіжжі ці породи утворюють Інгулецьку брилу, розташовану на захід від Кривого Рогу. Також вони поширені на схід від Криворізької структури і складають приблизно 60-65 % території Придніпровського блоку, утворюючи його ядро. Породи, які представляють є світло-сірими рівномірнозернистими гранітоїдами. За генезисом це ультраметаморфічні утворення, що виникли внаслідок глибокого переплавлення вулканогенно-осадових товщ аульської серії нижнього архею.

Близько 3,15 млрд р. тому розпочалася рифтогенна стадія формування Криворізької структури, що тривала до 2,5 млрд років. Вона поділена на два етапи.

1. Проторифтовий етап (3,15-2,6 млрд р.) це активний диз'юнктивізм з формуванням головних глибинних розломів – Криворізько-Кременчуцького, Східного та Східно-Ганнівського. Саме між ними відбулося опускання блоків земної кори та формування протокриворізького басейну седиментації.

2. Рифтовий етап (2,6-2,5 млрд р.) – заповнення ложа рифту магматичними розплавами, які піднімалися здовж розломів, утворюючи

метавулканогенно-осадову товщу. Саме ці процеси започаткували формування основи майбутнього Криворізького залізорудного басейну.

Архейський період розвитку Криворізької структури визначив її тектонічний каркас, літологічний склад і геодинамічне орієнтування. Саме в цей час сформувалася база, на якій у подальші геологічні епохи (переважно, в протерозої) розвивалися осадові, метаморфічні та рудоутворювальні процеси. Архейські гранітоїди й метаморфічні комплекси виступають не лише основою Криворізького басейну, а є важливим джерелом матеріалу для пізніших відкладів та рудних формацій.

Протерозойський етап відзначився формуванням залізистих кварцитів впродовж тривалого часу (близько 2,5-2,2 млрд р. тому) в умовах давнього океану утворилися величезні поклади залізистих кварцитів. У цей період відбувалося нашарування осадів, що містили залізо. Тектонічні рухи у цей період були активними і призвели до формування основних складчастих та розломних структур. Саме з цим періодом пов'язано виникнення криворізької серії, яка має складну будову.

В межах серії виділено декілька світ: новокриворізька, скелюватська, саксаганська, гданцівська і глеюватська що відрізняються літологічним складом, потужністю й рудоносністю.

Саксаганська світа є основною залізорудноносною товщею Криворізької структури. Вона представлена чередуванням сланцевих та залізистих горизонтів. В узагальненому розрізі виділяють сім перших та сім других. В межах окремих родовищ Криворізького басейну такий розріз криворізької серії представлений не повному обсязі. Сланцеві горизонти мають, переважно, кварц-біотитовий або кварц-амфібол-біотитовий склад. Залізисті горизонти складені різними типами залізистих кварцитів, серед яких найбільш поширеними є магнетитові, гематит-магнетитові, мартитові, магнетитові, силікат-магнетитові та гематит-мартитові. Товщина саксаганської світи у центральній частині Криворізької структури сягає 1400 м. На її частку припадає близько 80 % розвіданих запасів залізних руд Кривбасу, що робить її головним об'єктом промислової розробки.

Упродовж протерозойського етапу розвитку Криворізької структури відбувалися інтенсивні постметаморфічні та гідротермально-метасоматичні процеси, які суттєво трансформували первинний мінеральний склад і текстурно-структурні особливості кристалічних товщ криворізької серії. Вони охопили практично всю територію басейну – від Північного до Інгулецького залізорудних районів Кривбасу – і визначили сучасну мінералогічну та рудну специфіку регіону.

Метасоматичні зміни проявлені в рудних і в нерудних товщах криворізької серії: у залізистих кварцитах, кварцитосланцях, кварц-біотитових і амфіболових сланцях, доломітових мармурах. Найпоширенішими є натрієвий, залізний, кальцій-магнезіальний і кремнисто-карбонатний типи метасоматозу. Їх розвиток був тісно пов'язаний із циркуляцією високотемпературних гідротермальних розчинів по системі регіональних тектонічних порушень і зон дроблення, які формувалися в

результаті активізації земної кори на пізніх етапах тектоно-магматичної еволюції басейну [7, 20, 31, 38].

Натрієві метасоматичні процеси охоплюють значну частину Криворізької структури й, особливо інтенсивно, проявлені в межах Первомайського, Ганнівського, Інгулецького родовищ. Під дією натрієвих флюїдів у залізистих кварцитах і сланцях відбувалося заміщення первинних мінералів на альбіт, егірин, рибекіт. У результаті сформувалися егіринові, рибекітові метасоматити та альбітити, що утворюють зональні тіла навколо розломних структур. Натрієвий метасоматоз супроводжувався виносом кремнезему з порід та збагаченням їх на оксиди заліза, що створювало сприятливі умови для формування залізородних покладів гідротермально-метасоматичного походження [14, 15].

Залізисті метасоматичні процеси в Кривбасі проявлені, переважно, у формації гематит-магнетитових, мартитових і силікат-магнетитових кварцитів, що мають промислове значення. Вони виникли внаслідок циркуляції залізонасичених флюїдів, які проникали у зони брекчіювання та тріщинуватості. Ці процеси відбувалися як до, так і після основних фаз натрієвого метасоматозу, на основі чого можна говорити про багатостадійність флюїдного режиму. Результатом залізного метасоматизму стало збагачення первинних кварцитів оксидами заліза, редукція та переосадження гематиту і магнетиту, що сприяло утворенню високоякісних руд.

У зонах контакту кварцитів зі сланцями та карбонатними породами широко розвинуті карбонат-силікатні та доломітові метасоматити, представлені кварц-кальцитовими, кварц-доломітовими породами. Такі утворення характерні для південно-східної частини Криворізької структури, в межах глеюватської й гданцівської світ. Отже, слід відзначити взаємодію флюїдів із карбонатною складовою метаморфічної товщі криворізької серії.

Метасоматичні зони приурочені до глибинних і другорядних розломів, які пронизують усю товщу Криворізької серії. Ці порушення відігравали роль каналів для висхідних потоків натрій-залізистих розчинів. Найбільш інтенсивно перетворені породи зосереджені у зонах зім'яття та катаклазу, де спостерігається максимальна концентрація метасоматичних мінералів.

Метасоматичні перетворення відіграли визначальну роль у формуванні рудного потенціалу Кривбасу. Саме внаслідок натрій-залізистого метасоматозу відбулося додаткове збагачення протерозойських кварцитів залізом, що суттєво підвищило їх промислову цінність. Крім того, флюїдно-метасоматичні процеси сприяли перерозподілу й ремобілізації заліза, створенню локальних рудних лінз і штоків, які зумовлюють строкатий характер залізородного зруденіння у межах басейну. Таким чином, метасоматоз виступає не лише як накладений на метаморфізм

процес, а як підсилюючий фактор рудогенезу та структурної еволюції Криворізького басейну.

Наприкінці протерозою тектонічна активність поступово згасає, територія переходить у стадію стабілізації, відповідно, область Криворізької структури стає частиною стійкої платформи Східноєвропейського кратону.

Отже, протерозойський період став вирішальним етапом у становленні Криворізької структури. Саме тоді сформувалися її головні тектонічні елементи, метаморфічний комплекс і рудоносна товща, що визначають сучасний вигляд і мінерально-сировинний потенціал Криворіжжя.

В кайнозойський період (починаючи з 65 млн р. тому) відбулося неодноразове трансгресивно-регресивне коливання моря, пов'язане з активними тектонічними рухами Причорноморської западини. В результаті був сформований сучасний осадовий покрив докембрійських порід Кривбасу [44].

Початок опускання території поклала буцацька трансгресія (50,5-48,0 млн р. тому), яка призвела до проникнення морських вод у район Кривого Рогу. Вони заходили з півдня, через долини у кристалічному фундаменті. В результаті були відкладені піщано-глинисті товщі з прошарками вуглистих порід. Наприкінці буцацького часу відбулася регресія, що спричинила розширення суходолу й розвиток субтропічної лісової рослинності.

Після континентальної перерви територія Криворізької структури була знову затоплена під час київської трансгресії (середній еоцен). Цей період характеризувався чередуванням фаз опускання та незначних піднять дна, що обумовило формування уламково-хемогенних (від алевролітів до вапняків) відкладів з тонкими прошарками крупноуламкових (піщано-гравійно-галечникових) осадів. Завершилася київська трансгресія близько 43 млн р., після чого розпочався тривалий континентальний перерив, впритул до початку олігоцену.

На початку олігоцену (близько 33-30 млн р. тому) почалася борисфенська трансгресія. У новому морі накопичувалися піщано-гравелітові, галечникові та черепашиково-вапнякові відклади. У пізньосарматський час (пізній міоцен) площа морського басейну значно скоротилася. Відклади цього часу представлені переважно теригенними пісками та глинистими породами.

На початку меотичного віку (≈ 14 млн років тому) морський басейн знову розширився, проте осадконакопичення відбувалося в умовах лагунно-мілководного моря, де переважали піщано-карбонатні відклади.

У понтський час (5-2 млн р. тому) територія Криворіжжя вкривалася останнім у геологічній історії морем. У його прибережній зоні нагромаджувалися теригенні піщані та глинисті відклади, тоді як у відкритій частині – відкладалися черепашиково-вапнякові осади.

Після відкату Понтського моря (кінець пліоцену) територія Кривбасу остаточно перетворилася на суходіл, який існує до сьогодні. Подальший розвиток району відбувався в умовах континентального режиму

осадконакопичення, що визначило формування четвертинних відкладів – лесоподібних суглинків, алювіальних пісків, чорноземів і ґрунтів.

Таким чином, кайнозойський етап розвитку Криворізької структури характеризується чередуванням морських і континентальних фаз, що зумовило формування різновікових осадових комплексів і завершило тривалу геологічну еволюцію території. Саме в цей період сформувався сучасний морфоструктурний вигляд Кривбасу, що поєднує залишки древніх морських рівнин і денудаційних поверхонь Українського кристалічного щита.

Подальші геологічні процеси (денудація та ерозія) призвели до формування сучасного рельєфу території, який включає річкові долини та яри.

Остаточний сучасний вигляд територія, що описується, набула через антропогенну діяльність. Внаслідок інтенсивної розробки залізних руд і розвитку інфраструктури району, були сформовані численні кар'єри, шахти, відвали шламо- та водосховища тощо, які змінили будову геологічного середовища Криворіжжя.

Осторонь слід розглянути гіпергенні процеси в межах Криворізької структури, оскільки вони охоплювали широкий інтервал часу. Гіпергенні перетворення різновікових порід є відбитком послідовної зміни геологічних і кліматичних обстановок впродовж усієї історії розвитку району – від архею до сучасності. Вони відіграли ключову роль у формуванні як залишкових залізистих руд, так і матеріалу осадових товщ кайнозойського чохла [7].

1.4. Корисні копалини

Надра Криворізького залізорудного басейну характеризуються різноманітним мінерально-сировинним потенціалом, сформованим упродовж тривалого геологічного розвитку – від архею до кайнозою. Основну промислову цінність становлять залізні руди, але також поширені інші металеві та неметалеві корисні копалини.

Основу мінеральних багатств Кривбасу становлять залізисті кварцити та багаті залізні руди. Серед них найпоширеніші є такі типи руд:

- магнетитові кварцити – складаються переважно з магнетиту та кварцу; містять 30-45 % Fe;
- гематит-мартитові кварцити – безрудні кварцові прошарки перемежуються з гематит-магнетитовими; вміст Fe до 55 %;
- багаті руди – мартитові, гематитові, гематит-мартитові та гетитові мінеральні різновиди з вмістом Fe понад 60-68 %.

Залізні руди видобувають кар'єрами і шахтами. Основними родовищами є: Скелюватське, Первомайське, Ганнівське, Велика Глеюватка, Інгулецьке, Артемівське, Новокриворізьке, шахт Козацька, Тернівська, ім. С.М.Калачевського тощо.

На південному заході басейну виявлені поклади бурих марганцевих руд, приурочені до неогенових осадових товщ. Вони мають оксидно-гідроксидний склад (піролюзит, псиломелан, манганіт) і формувалися у прибережно-морських умовах. Хоча промислове значення цих руд менше порівняно з Нікопольським басейном, вони є перспективними для комплексного використання.

До неметальних ресурсів Криворізького басейну належать:

- будівельні матеріали – пісковики, доломіти, вапняки, мергелі, суглинки, гравій, щебінь;
- вогнетривкі та керамічні глини, каолін, бентонітові глини;
- кварцові піски, придатні для виробництва скла і металургії в якості формувальних;
- гідромінеральні ресурси – мінералізовані підземні води, які використовуються для технічних і лікувально-профілактичних потреб (радонові води).

У кайнозойських відкладах, особливо палеогенових, трапляється буре вугілля та бітумінозні глини. Їхня потужність невелика, проте вони можуть мати локальне значення для регіональних енергетичних потреб, особливо у часи гострої енергетичної нестачі (блекаути, руйнація критичної інфраструктури тощо).

Мінерально-сировинний потенціал Криворізького басейну залишається стратегічною основою металургійної промисловості України. Запаси залізних руд оцінюються у десятки мільярдів тонн, з яких близько половини придатні до відкритої розробки. Крім того, комплексне використання надр, залучення до переробки покладів супутньої сировини – кварцу, доломітів, глин, флюсових вапняків і рідкісних металів – відкриває перспективи для подальшого розвитку гірничо-металургійного комплексу Кривбасу [5, 6, 9, 12, 13, 17, 21].

Висновки за 1 розділом

Криворізький басейн є одним із ключових індустриальних центрів України, де розвиток гірничодобувної та металургійної промисловості визначає економічний та соціальний ландшафт регіону. Інтенсивна експлуатація залізорудних родовищ та супутніх корисних копалин впливає на всі компоненти довкілля, включаючи водосховища, річки та підземні води, змінюючи їх гідрохімічний склад, рівень забруднення та екосистемні функції. Водночас, сучасний стан водних об'єктів Кривбасу визначається не лише локальними антропогенними факторами. На гідрологічні й екологічні параметри басейну впливають глобальні процеси, зокрема потепління клімату, зміни режиму опадів, посилення пилових бур та переносу аерозольного матеріалу з пустельних регіонів, що призводить до додаткового забруднення та трансформації гідросистем.

Таким чином, сучасний екологічний стан басейну є результатом комплексної взаємодії регіональної індустріальної діяльності та глобальних кліматичних і геоекологічних процесів, що потребує інтегрованого підходу до моніторингу, охорони і сталого управління водними ресурсами та навколишнім середовищем Криворіжжя.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Карачунівське водосховище

Водосховище є одним із ключових гідротехнічних об'єктів Дніпропетровської області, що відіграє визначальну роль у системі водопостачання міста Кривого Рогу та навколишніх населених пунктів. Воно виконує комплексні функції – господарсько-побутові, промислові, сільськогосподарські та рекреаційні, водночас залишаючись важливим компонентом природного середовища регіону [49].

Водосховище розташоване на річці Інгулець, у межах Лозуватської територіальної громади Криворізького району (рис. 2.1). Площа водного дзеркала становить понад 36 км², а корисний об'єм – близько 291,5 млн м³. Середня глибина водойми сягає 5-6 м, а у ділянці старого русла – до 12 м. Гідротехнічна споруда створена у межах виходу кристалічних порід Українського щита, що зумовило формування порогів і створило сприятливі інженерно-геологічні умови для будівництва греблі.

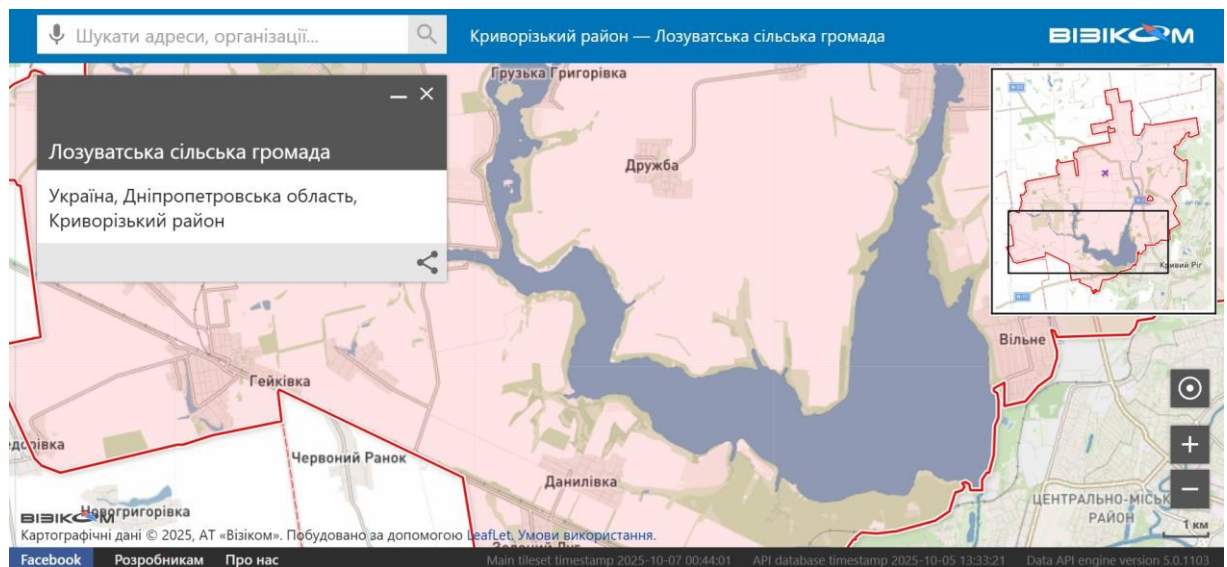


Рис. 2.1 – Оглядова схема розміщення акваторії (синє) Карачунівського водосховища.

Червоне – контури Лозуватської сільської громади [48].

Гребля Карачунівського водосховища віднесена до I класу капітальності. Її довжина становить 205 м, висота – 24 м, ширина на рівні

гребеню – 7,5 м. Береги водойми укріплені лісонасадженнями, які виконують протиерозійну, рекреаційну та водоохоронну функції, сприяють стабілізації берегової лінії та покращенню мікроклімату прибережної зони (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Гребля Карачунівського водосховища. Фото: Дніпропетровська обласна прокуратура; з повідомлення Марини Тищенко (28.12.2021; інтернет-видання ЛІГА.net [52]).

Водосховище є не лише стратегічним джерелом питного водопостачання, але й визначною природною та ландшафтною домінантою Криворізького регіону, відіграючи важливу роль у формуванні екосистеми басейну р. Інгулець (рис. 2.3).

Потреба у великому водному об'єкті виникла на початку 1930-х років, коли у Кривому Розі розпочалося будівництво металургійного заводу (нині – «АрселорМіттал Кривий Ріг»). Через дефіцит прісної води для промислових і побутових потреб було прийнято рішення про спорудження Карачунівського водосховища. Перша черга будівництва тривала у 1932-1938 рр., друга – у 1954-1958 рр.

Водосховище виконує багатофункціональні завдання. Станція очищення здатна підготувати до 200 тис. м³ води щодоби для господарсько-питних потреб населення. Щорічний забір води для питного водопостачання сягає 40 млн м³, для зрошення – близько 0,2 млн м³. У маловодні роки передбачається додаткова подача води з Дніпра каналом Дніпро-Інгулець у обсязі 20-60 млн м³. Завдяки цьому водосховище підтримує екологічний баланс у нижній течії річки Інгулець, де у міжвегетаційний період здійснюється розбавлення високомінералізованих шахтних і промислових стоків.



Рис. 2.3 – Узбережжя Карачунівського водосховища. Фото: Дніпропетровська обласна прокуратура; з повідомлення Марини Тищенко (28.12.2021; інтернет-видання ЛІГА.net [52]).

Карачунівське водосховище забезпечує питною водою мешканців Кривого Рогу, є джерелом для промислових підприємств та аграрного сектору. Його значення виходить за межі суто господарської функції: водойма є центром рекреаційної активності, на її берегах діють туристичні бази, пансіонати, дитячі табори. Лісонасадження навколо (близько 300 га) виконують не лише захисну, але й рекреаційну роль, формуючи Карачунівський лісовий масив.

Дослідження гідроекологічного стану водойми показують поступове погіршення якості води. Роботи українських вчених (Третьяков О. В., Андронов В. А.) виявили тісний зв'язок між концентрацією іонів марганцю та біологічним споживанням кисню, що свідчить про значний розвиток фітопланктону і органічне забруднення. Ця проблема ускладнює підготовку води для питного водопостачання та не відповідає вимогам державних стандартів. За багаторічний період зафіксовано чітку тенденцію до зниження екологічної якості водойми [16, 53].

З метою мінімізації негативного впливу у 2004 р. було побудовано горизонтальну дренажну систему, яка запобігає проникненню засолених вод у водосховище. Також ведуться роботи зі зміцнення греблі та контролю якості стічних вод промислових підприємств. Проте рівень техногенного навантаження залишається високим [50].

На сучасному етапі функціонування Карачунівського водосховища супроводжується рядом екологічних проблем, пов'язаних із техногенною трансформацією басейну Інгульця, забрудненням промисловими та шахтними стоками, а також наслідками воєнних дій останніх років, що

порушили гідрологічний режим і спричинили вторинне забруднення донних відкладів.

Сьогодні на стан водосховища впливають не лише антропогенні чинники, але й глобальні кліматичні зміни – підвищення середньорічних температур, зменшення кількості атмосферних опадів, збільшення випаровування, а також пилові бурі та аерозольний переніс з посушливих регіонів, що призводить до збагачення води зваженими частинками та хімічними домішками.

14 вересня 2022 року, близько 17:00, російські окупаційні війська здійснили ракетний обстріл м. Кривого Рогу, випустивши щонайменше сім ракет «Іскандер» та одну ракету гіперзвукового комплексу «Кинджал». Шість із них влучили у район Карачунівського водосховища, спричинивши серйозні пошкодження гідротехнічних споруд.

Унаслідок удару відбулося раптове підняття рівня води у річці Інгулець на 1-2 метри, що призвело до підтоплення 112 приватних будинків. Частина районів міста залишилася без водопостачання, зокрема близько 5000 жителів Софіївської селищної громади та 7000 жителів Лозуватської громади (рис. 2.4).

У ніч на 15 вересня голова ради оборони Кривого Рогу Олександр Вілкул оголосив часткову евакуацію населення з двох районів міста, оскільки рівень води в Інгульці досяг історичного максимуму. Для запобігання подальшому затопленню екстреним службам довелося провести два контрольовані підриви на дамбі нижче за течією, щоб збільшити пропускну здатність русла річки та стабілізувати рівень води.

На третій день після удару (16 вересня 2022 року) вода в Інгульці набула червонуватого відтінку, що, за припущеннями фахівців, було пов'язано зі зміною течії річки та її рухом по глинистих ґрунтах. Зруйновані ділянки греблі були оперативно засипані бутром, суглинком і щебенем, що дозволило відновити стабільність споруди й нормалізувати водопостачання міста. На ранок 16 вересня витік води через зруйнований затвор було ліквідовано; загальний об'єм втрачених вод склав 16 873 м³. Згідно з офіційними актами, докільню було завдано збитків на суму понад 77 млн грн.

Карачунівське водосховище сьогодні перебуває під впливом комплексу антропогенних і глобальних чинників. До перших належать інтенсивна промислова діяльність Кривбасу, забруднення шахтними водами, техногенні аварії та воєнні дії. До других – глобальне потепління, зростання посушливості клімату, зміни режиму опадів та пилові бурі, що приносять аерозольні частинки з посушливих регіонів Євразії. Ці процеси впливають на якість води, біологічну продуктивність і гідрохімічну рівновагу водойми.

Отже, Карачунівське водосховище є стратегічно важливим, але екологічно вразливим об'єктом, який потребує постійного моніторингу, впровадження системи екологічного управління, підвищення техногенної безпеки гідроспоруд та розробки заходів адаптації до глобальних кліматичних змін.



а



б

Рис. 2.4 – Зруйнована гребля Карачунівського водосховища (а) і наслідки підтоплення (б). Фото зі статті «Щоб зупинити потоп у Кривому Розі, рятувальники організували підрив греблі», Андрій Хрустальов. Інформатор Україна – незалежний всеукраїнський портал новин [56].

2.2 Кресівське водосховище

Кресівське водосховище є одним із ключових елементів гідротехнічної системи басейну річки Саксагань, що формує важливу ланку у структурі водогосподарського комплексу Криворізького промислового району. В умовах високої індустріалізації та щільної урбанізації штучні водойми цього регіону виконують багатофункціональну роль, забезпечуючи технічні потреби промисловості, підтримуючи побутове водопостачання та водовідведення, формуючи умови для рекреаційного використання, а також впливаючи на екологічний стан довкілля. Кресівське водосховище є характерним прикладом такого поєднання, де господарська доцільність і природоохоронні аспекти тісно переплітаються, створюючи як можливості, так і виклики для сталого розвитку території.

Водосховище розташоване у північно-східній частині міста Кривого Рогу в межах Покровського та Тернівського районів. Його географічне положення визначається близькістю до промислових підприємств гірничодобувного комплексу та густонаселених житлових масивів, що формує унікальне поєднання техногенних і природних факторів у межах одного ландшафтного комплексу. Водойма належить до каскаду Саксаганських водосховищ, які у сукупності створюють гідрологічну систему, що регулює стік річки Саксагань та забезпечує потреби різних секторів міського господарства (рис. 2.5).

Особливістю просторового розташування є те, що водосховище оточене низкою населених пунктів та мікрорайонів: КРЕС, Божедарівка, Окунівка, Рибасове, 129-й квартал, Суха Балка, Соколовка, селище Кресівське-2, а також мікрорайони Зарічний (4-й і 5-й). Така конфігурація визначає активну взаємодію водойми з антропогенним середовищем і перетворює її на важливий соціально-просторовий центр, що впливає на повсякденне життя значної кількості мешканців.

Назва Кресівського водосховища безпосередньо пов'язана з Криворізькою районною електростанцією (КРЕС), для забезпечення технічних потреб якої воно й було споруджене. Його створення припадає на післявоєнний період активного розвитку гірничо-металургійного комплексу Криворізького басейну, коли зростання енергоспоживання промисловості потребувало створення надійної системи технічного водопостачання.

На початку створення водойма мала суто технологічне призначення – забезпечення циркуляції та охолодження води для Криворізької електростанції, а також постачання води на промислові об'єкти, розташовані в центральній і південній частині Кривбасу. Згодом функції водосховища розширилися – його стали використовувати для господарсько-побутових, зрошувальних та рекреаційних потреб. Воно стало важливим елементом водогосподарського комплексу регіону.

Близькість водойми до житлових районів та природних зелених зон сприяла її поступовій рекреаційній трансформації: уздовж берегів почали

формуватися зони відпочинку, садово-дачні масиви, риболовецькі ділянки, а сама водойма стала частиною локальної системи ландшафтної стабілізації. На базі водосховища було організовано клуб юних моряків (рис 2.6, 2.7).

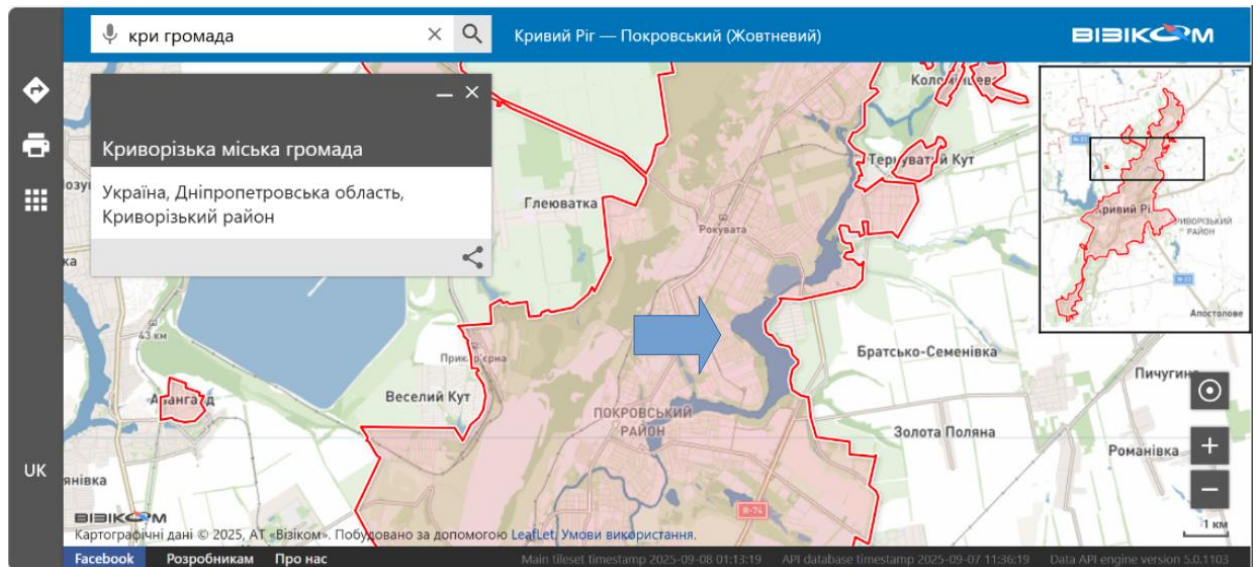


Рис. 2.5 – Оглядова схема розміщення акваторії (синя стрілка) Кресівського водосховища.

Червоне – контури Криворізької міської територіальної громади [47].

Після підриву греблі Каховської ГЕС у червні 2023 року Кривбас опинився у критичній ситуації водозабезпечення. Через руйнування водосховища стало неможливим наповнення Південного водосховища – ще одного з резервуарів технічної води для промислових підприємств регіону – через канал «Кривий Ріг – Дніпро», який до того часу забезпечував його основне живлення.

У зв'язку з цим було ухвалено надзвичайне рішення про організацію перекачування води з Кресівського водосховища до Південного. Для цього розроблено тимчасову систему перекачування та подачі води, що дозволила стабілізувати роботу промислових об'єктів та частково забезпечити потреби міського господарства.

Таким чином, Кресівське водосховище набуло стратегічного значення, ставши резервним джерелом живлення для Південного водосховища в умовах гідрологічної кризи. Цей захід дав змогу уникнути зупинки виробничих процесів на підприємствах гірничо-металургійного комплексу та запобігти техногенним ризикам, пов'язаним із дефіцитом технічної води.

Сьогодні Кресівське водосховище виконує комплексну функцію – це одночасно технічний, господарський та екологічний об'єкт, що бере участь у регулюванні водного балансу Кривбасу. Його роль особливо зросла після втрати Каховського водосховища, адже саме воно забезпечує гнучкість і стійкість локальної водогосподарської системи регіону.

Разом із тим, інтенсивна гірничодобувна, металургійна та енергетична діяльність у межах басейну створює техногенне навантаження на водойму – спостерігається підвищення мінералізації, накопичення завислих речовин і

вторинне забруднення донних відкладів. До антропогенних чинників додаються глобальні кліматичні зміни – підвищення температури, зменшення кількості опадів, посилення пилових бур із південного напрямку, що додатково впливають на водний режим і якість води.



а



б

Рис. 2.6 – Пляж парку шахтарський, розташований на березі Кресівського водосховища.

а – вигляд із супутника; синя стрілка – пляж;

б – вигляд на пляж. Фото з [54].



а



б

*Рис. 2.7 – Клуб юних моряків поруч з Кресівським водосховищем.
а – корпус клубу [41]; б – заняття з греблі [43].*

Попри це, Кресівське водосховище залишається ключовою ланкою водної системи Криворізького регіону, без якої забезпечення промислових, господарських та соціальних потреб стало б неможливим. Його сучасне функціонування підтверджує важливість гнучких водогосподарських рішень

у кризових умовах та необхідність постійного екологічного моніторингу як гарантії стабільності системи водопостачання Кривбасу.

Висновки за розділом 2

Обидва водосховища, Кресівське та Карачунівське, виконують комплексні функції, поєднуючи технічне водопостачання промислових підприємств із рекреаційними та господарськими потребами населення. Карачунівське водосховище є основним джерелом питної води для Кривого Рогу, а також використовується для зрошення, промислових оборотних систем і риборозведення. Кресівське водосховище, спочатку створене для технічних потреб КРЕС, нині активно використовується для рекреації, рибальства та зрошення.

Для обох водосховищ характерний високий рівень антропогенного впливу. Карачунівське водосховище піддається впливу промислових стоків, урбанізованих територій і подій надзвичайного характеру (наприклад, ракетні обстріли 2022 року, що призвели до підвищення рівня води і забруднення річки Інгулець). Кресівське водосховище піддається впливу побутових стоків, сміттєзвалищ і діяльності кар'єрів ПрАТ «ЦГЗК». В обох випадках спостерігаються процеси евтрофікації, підвищення концентрації біогенних елементів та ризики погіршення якості води для питних і господарських потреб.

Обидва водосховища потребують інтегрованого підходу до управління водними ресурсами, який поєднуватиме моніторинг якості води, захист від забруднення та раціональне використання рекреаційного потенціалу. Карачунівське водосховище потребує особливої уваги щодо техногенних ризиків та захисту греблі, оскільки його руйнування може спричинити катастрофічні наслідки для міста та довкілля. Кресівське водосховище потребує контролю над побутовими та промисловими стоками для збереження екологічної стійкості та рекреаційної цінності.

Також важливо враховувати, що ресурси Карачунівського водосховища використовуються для екологічного оздоровлення річки Інгулець після регламентного скиду надлишкових високомінералізованих вод з відстійника балка Свистунова. Погіршення гідроекологічного стану Карачунівського водосховища, що впливає на потреби населення у питній воді, екологічну безпеку та забезпечення здоров'я спільноти, обумовлює оперативного вжиття заходів для вирішення проблеми погіршення якості води. Зазначене питання може бути з успіхом реалізоване завдяки використанню методів ГІС та ДЗЗ (дистанційного зондування Землі).

3. ФАКТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аерозольний індекс (АІ) – це показник, який характеризує ступінь оптичної щільності (AOD) або концентрації аерозольних частинок у атмосфері, що визначають інтенсивність розсіювання та поглинання сонячного випромінювання. Індекс є важливим показником, який характеризує рівень запиленості та концентрацію зважених частинок у приземному шарі атмосфери над водною поверхнею. Його значення дає змогу оцінити потенційну інтенсивність осідання пилу на дзеркало водосховища, що безпосередньо впливає на якість води та екологічний стан акваторії. Підвищені значення АІ над водосховищами зазвичай спостерігаються у промислових регіонах або поблизу зон активного землекористування – кар’єрів, металургійних підприємств, транспортних магістралей, сільськогосподарських територій. В таких умовах повітряний потік переносить частинки пилу, які з часом осідають на поверхню води, збагачуючи її сполуками важких металів, оксидами, вуглецевими та сульфатними домішками. Це спричиняє зміни у фізико-хімічному складі води, збільшення мутності, накопичення токсичних речовин у донних відкладах і негативно позначається на біологічних процесах у водоймі [57].

Моніторинг АІ над поверхнею Землі, у тому числі над водосховищами, здійснюється за допомогою супутникових систем дистанційного зондування Землі (наприклад, MODIS, Sentinel-5P, OMI) або наземних спостережних станцій. Аналіз його просторових і часових змін дозволяє виявляти періоди підвищеного пилового навантаження, оцінювати ризики вторинного забруднення води та визначати ефективність природоохоронних заходів. Для визначення АІ на супутнику Sentinel-5P розміщено прилад TROPOMI, який є спектрометром зображення з надиром, що охоплює діапазони довжин хвиль від ультрафіолетового до короткохвильового інфрачервоного. Приладом вимірюють сонячне випромінювання відбите Землею та випромінюване нею [42, 51]. Градація значень АІ наведено в табл. 3.1.

В основу досліджень покладені дані, розміщені у відкритому доступі на ресурсі Copernicus Browser, що забезпечує доступ до супутникових знімків та тематичних продуктів дистанційного зондування Землі. Значення аерозольного індексу були вивантажені зі супутникових продуктів місії Sentinel-5P (TROPOMI). Отримані знімки були експортовані у форматі CSV (рис. 3.1), окремо для акваторій Карачунівського та Кресівського водосховищ. Подальша статистична обробка проведена за допомогою

таблиць Excel. Загальна кількість проаналізованих даних склала 3642, для Карачунівського водосховища 1820, для Кресівського – 1822.

Таблиця 3.1.

Шкала AI Sentinel-5P

Значення AI	Тлумачення	Опис
1	2	3
< 0	чисте небо або наявність хмар (немає поглинаючих аерозолів)	нормальні атмосферні умови
0 – 1	дуже низький рівень аерозолів	легкий фоновий пил, міський смог
1 – 2	слабке забруднення	можливі аерозолі від диму чи пилу
2 – 3	помітна кількість аерозолів	дим або пилова хмара, видно на знімках
3 – 4	висока концентрація	активні пожежі або великі пилові шторми
> 4	дуже сильне забруднення, екстремальні події	виверження вулканів, масштабні пожежі, піщані бурі

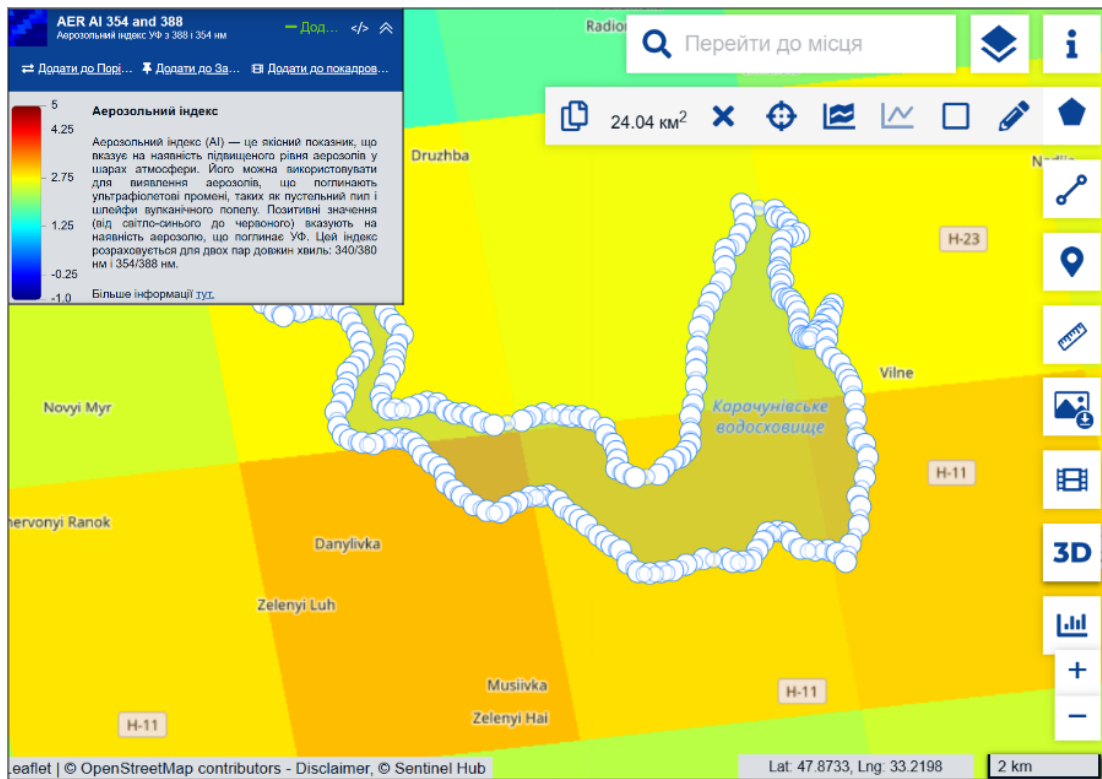
Оскільки хмари закривають нижні шари атмосфери, де знаходиться більшість аерозолів (пил, дим тощо), супутниковий сенсор може не «бачити» справжню концентрацію частинок, відповідно, виміряний AI занижуються. В зв'язку з чим, з вихідної бази даних, була відібрана інформація за дати, коли щільність хмар не перевищувала 10. Для цього з Copernicus Browser були вивантажені дані про щільність хмар над акваторіями водосховищ. Загальна кількість значень склала 2774, з них 1305 для Карачунівського і 1469 для Кресівського. Далі, з бази були відібрані значення AI від 0 і вищі, з метою опрацювання даних, що вірогідніше відповідають пиловому забрудненню атмосфери над Карачунівським і Кресівським водосховищами. А інформація про розсіючі аерозолі (вплив хмар, туманів та інших факторів, що обумовлюють від'ємні значення AI) була виключена. Кількість значень у відфільтрованих вибірках для Карачунівського водосховища склала 156, для Кресівського – 143, загалом – 299.

Також були проаналізовані дані, згруповані за стандартними кліматичними сезонами (літо, осінь, зима, весна) для виявлення закономірностей, пов'язаних із зміною погодних умов та антропогенної активності, наприклад, опалювальний сезон.

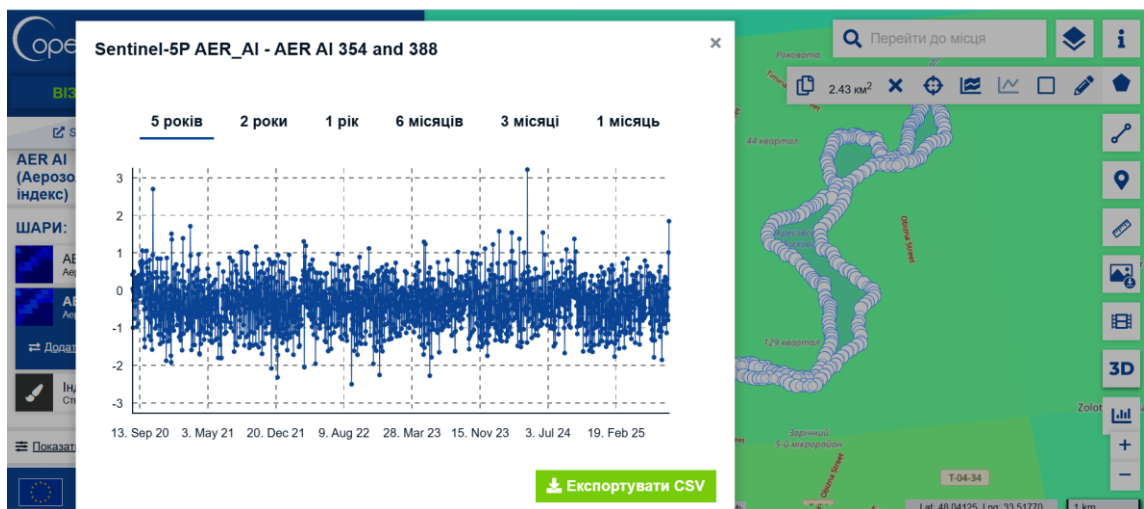
Для зазначених статистичних вибірок були виявлені центральні тенденції та діапазон коливання значень аерозольного забруднення за окремими роками, а також за окремим сезонами за останні 5 років.

Медіанне значення (середньорічне та середнє для сезонів) використовувалося як більш надійний показник центральної тенденції, що

забезпечує високу стійкість до аномальних пікових значень. Завдяки своїй інваріантності до викидів, медіана відображає типовий рівень забруднення атмосфери, характерний для певного періоду або території, що дозволяє отримати репрезентативну оцінку фоновому стану повітряного середовища.



а



б

Рис. 3.1 – Контури акваторій Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ.

Діапазон коливань (мінімальне – максимальне) значення концентрації аерозольних частинок характеризує амплітуду варіацій, що є важливим для виявлення короточасних епізодів підвищеного забруднення, що мають екстремальний або потенційно небезпечний характер.

Обрана методика дозволила здійснити об'єктивну оцінку як типового фонового рівня аерозольного забруднення, так і частоти та інтенсивності пікових подій. Такий підхід є доцільним у межах багаторічних моніторингових спостережень, оскільки сприяє комплексному аналізу просторово-часової мінливості параметрів аерозольного навантаження над водними об'єктами досліджуваного регіону.

Аналогічний підхід було застосовано для аналізу NDVI та NDWI в межах площ водосховищ.

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI кількісний показник, що використовується в дистанційному зондуванні Землі для оцінки кількості фотосинтетично активної біомаси, тобто здоров'я, щільності та загального стану рослинності. NDVI є ефективним показником для кількісної оцінки зеленої біомаси. Діапазон значень NDVI коливається від -1 до 1. Розрахунок NDVI ґрунтується на унікальній взаємодії здорової рослинності з сонячним світлом у двох ключових діапазонах спектра: 1) поглинання у видимому червоному діапазоні (здорова рослинність інтенсивно поглинає червоне світло для процесу фотосинтезу); 2) відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (здорова рослинність інтенсивно відбиває ближнє інфрачервоне випромінювання завдяки клітинній структурі листя). Індекс розраховується за формулою (3.1). Інтерпретації значень NDVI наведена в таблиці 3.2.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (3.1)$$

де *NDVI* – нормалізований диференційний вегетаційний індекс; *NIR* – коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні спектра; *RED* – коефіцієнт відбиття у видимому червоному діапазоні спектра.

Таблиця 3.2

Шкала NDVI Sentinel-2 L2A		
Діапазон значень індексу	Тлумачення	Опис
1	2	3
~ -1	сильне поглинання NIR	вода
-0,1 до 0,1	відбиття NIR і RED приблизно рівне	оголені ділянки територій: скелі, пісок, сніг, забудови
0,2 до 0,4	помірне відбиття NIR	слабка рослинність: чагарники, луки, рідкісні посіви.
~ 1	сильне відбиття NIR	ділянки зі здоровою густою рослинністю: помірні та тропічні ліси, культури на піку вегетації

NDVI є потужним інструментом і широко використовується в різних галузях, наприклад, сільське та лісове господарство, екологія, гідрологія, кліматологія. Тому використання його для оцінки водосховищ є обґрунтованим.

Нормалізований диференційний індекс води NDWI є показником, який спеціально розроблений для виділення водних об'єктів та приглушення сигналу від рослинності та ґрунту (3.2). Інтерпретації значень NDWI наведена в таблиці 3.3.

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (3.2)$$

де *NDWI* – нормалізований диференційний індекс води; *GREEN* – коефіцієнт відбиття у видимому зеленому діапазоні спектра; *NIR* – коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні спектра.

Таблиця 3.3

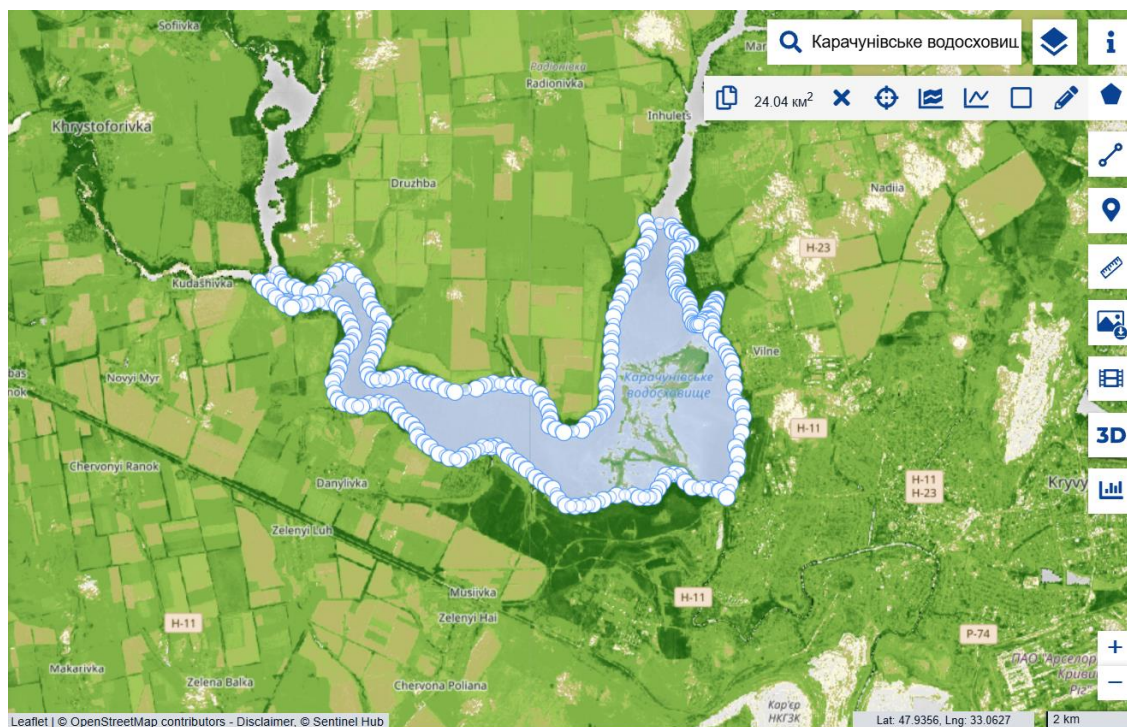
Шкала NDWI Sentinel-2 L2A

Діапазон значень індексу	Об'єкт	Оптичні Властивості
1	2	3
>0,5	водні об'єкти	вода поглинає NIR і відносно сильно відбиває GREEN
<0,5	об'єкти, вкриті рослинністю	рослинність сильно відбиває NIR і поглинає GREEN
0,0 до 0,2	об'єкти інфраструктури	помірне та приблизно рівне відбиття в обох діапазонах: бетон, дороги та будівлі

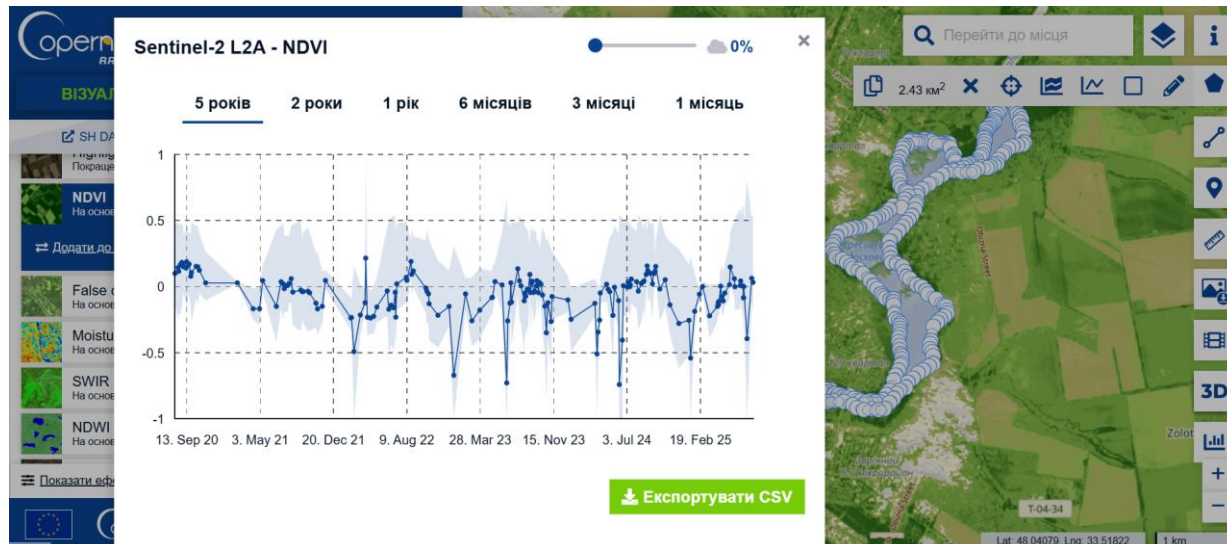
Індекс NDWI часто використовується як синонім індексу NDMI (нормалізований диференційний індекс вологості), який розраховують за формулою 3.2, використовуючи замість GREEN коефіцієнт SWIR. Показник NDMI підкреслює відмінності у вмісті води у листі рослин, а NDWI показує відмінності у вмісті води у водоймах. Таким чином, значення NDWI вище 0,5 є чітким індикатором присутності відкритої води. Тому вибір NDWI є найбільш доцільним для картографування площі водосховищ та інших відкритих водних об'єктів.

Значення NDVI були вивантажені зі супутникових продуктів місії Sentinel-2 L2A-3, а NDWI – з Sentinel-2 L2A-7. Були відібрані супутникові знімки з хмарністю 0%. Отримані дані експортовані у форматі CSV (рис. 3.2, 3.3) для подальшої статистичної обробки в таблицях Excel. Загальна кількість проаналізованих даних NDVI склала 246, для Карачунівського водосховища 73, для Кресівського – 173. Значна різниця в кількості значень

обумовлена більшою «захмарованістю» атмосфери над Карачунівським водосховищем. Загальна кількість значень NDWI склала 318 з них для Карачунівського водосховища 145, для Кресівського – 173.

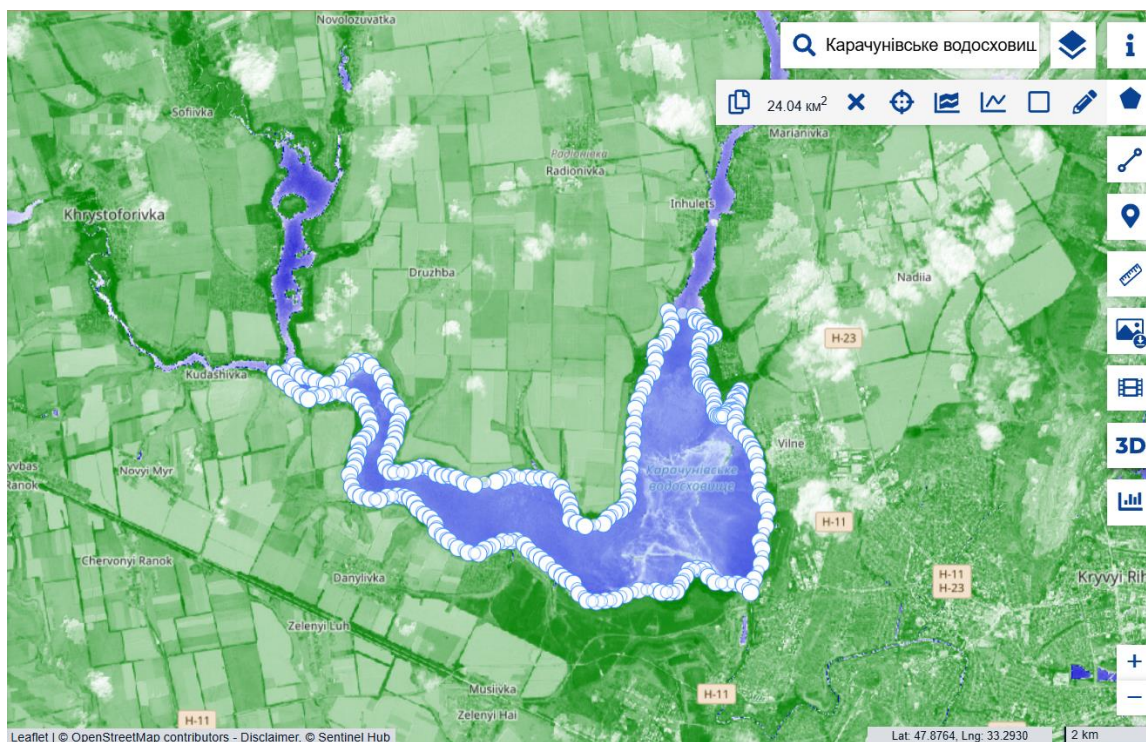


а



б

Рис. 3.2 – Контури акваторій Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ для вивантаження даних про NDVI за 5 років.



а



б

Рис. 3.3 – Контури акваторій Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ для вивантаження даних про NDWI за 5 років.

Список і обсяги виконаних автором кваліфікаційної роботи завдань наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Перелік виконаних робіт та використаного фактичного матеріалу

Види робіт	Об'єми
1	2
аналіз інформаційних джерел	58 джерел
оконтурення акваторій водосховищ	2 контури
підбір знімків супутника Sentinel-5P	51 знімок
підбір знімків супутника Sentinel-2	44 знімки
вивантаження і аналіз даних	6 977 значень
фільтрування вихідних вибірок	3 642 значень
побудова діаграм	12 діаграм
оформлення рукопису пояснювальної записки	1 рукопис
оформлення додатків	7 додатків
оформлення презентації	1 презентація

Висновки за 3 розділом

Застосовані методи і чисельність фактичного матеріалу підтверджують достовірність результатів, які висвітлені у розділі 4. Вони відповідають поставленим автором кваліфікаційної роботи завданням і меті дослідження.

4.

ДИНАМІКА СТАНУ КАРАЧУНІВСЬКОГО ТА КРЕСІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩ ЗА ОСТАННІ П'ЯТЬ РОКІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ В МЕЖАХ КРИВОРІЗЬКОГО РАЙОНУ

4.1. Огляд фондових і опублікованих даних за темою роботи

Над водосховищами аерозольний індекс набуває особливого значення, адже він свідчить про інтенсивність надходження частинок із повітря до поверхні води. Високий АІ над акваторією може вказувати на те, що пил або інші зважені частинки з атмосфери осідають на дзеркало водосховища, що має наслідки для якості води, її мутності, хімічного складу та стану біоти. Результати дослідження АІ над територіями різних країн, у тому числі над поверхнею природних та штучних водойм висвітлені у низці робіт.

Вченим [30] завдяки алгоритму, який включав пов'язану модель радіаційного переносу атмосфера-океан у поєднанні з комплексним біооптичним океанічним модулем для спільного моделювання відбиття у верхній частині атмосфери та яскравості води безпосередньо над поверхнею океану, вдалося уникнути необхідності складних операцій корекції супутникових даних.

Стаття [23] присвячена багаторічному аналізу просторово-часових закономірностей аерозольної оптичної товщини (AOD) над територією Східної Європи на основі супутникових даних MODIS. Автори досліджують сезонні та річні коливання аерозольного індексу, виявляючи зростання концентрації часток у промислових регіонах та під час літніх посух. Результати вказують на вплив антропогенних факторів, зокрема промислових викидів і пилових бур, на формування аерозольних шарів. Робота є важливим джерелом для оцінки якості повітря, кліматичних тенденцій і потенційного впливу аерозолів на водні екосистеми, зокрема у промислових регіонах на кшталт Криворізького.

В роботі [33] автори проаналізували вплив типу землекористування (LULC) на оптичну глибину аерозолію (AOD). За отриманими результатами вчені дійшли висновку, що вищі значення показнику зосереджені над водоймами, розташованими в місцевостях з нижчим рельєфом і у оточенні високими будівлями або горами. Значення AOD над водоймами і над ділянками, що вкриті інтенсивною рослинністю, характеризуються зворотною кореляцією. Значення AOD над водоймами та забудованими землями позитивно корелюють між собою. Таким чином, автори звертають

увагу наукової спільноти, що на значення AOD впливає контекст територій, що оточують водойму.

Стаття [32] містить відомості про систематичні спостереження динамічних характеристик поверхневих вод та аерозолів над територією Каліфорнії (США), країн Середньої Азії (Казахстан, Узбекистан, Таджикистан), а також Китайської народної республіки (КНР) у період поміж 2000 та 2018 роками. Вчені виявили сезонні коливання значень оптичної глибини аерозолію. Найбільші значення характерні навесні, найменші – восени. Також ними зафіксоване збільшення значення AOD з початку спостережень, що вони пояснюють посиленням посушливості і зменшенням площі водойм.

Далі наведемо огляд результатів досліджень оптичної товщини аерозолів над територією України.

У статті [29] подано огляд вимірювань AOD, спектральних характеристик, альbedo одиничного розсіювання тощо, які проводились на території України за допомогою мережі AERONET та супутникових даних. Автори не фокусуються на конкретних водосховищах України, а розглядають територію нашої країни загалом. Вони зазначають, що показник AOD варіює в широких межах в залежності від сезону, джерел забруднення і метеоумов. Тобто, відстежувати динаміку змін аерозольного індексу, у тому числі над водоймами, доцільніше не тільки за середньорічним значенням, а також за окремими сезонами.

Стаття [11] присвячена створенню системи супутникового моніторингу якості повітря. Метою дослідження є розроблення методики оперативного аналізу концентрацій газових забруднювачів (NO_2 , SO_2 , CO , HCHO , O_3) за даними супутника Sentinel-5P / TROPOMI. Дані обробляються щоденно з побудовою регулярної сітки та деталізацією для міст до 2 км. Запропоновано алгоритм downscaling, що дозволяє оцінювати просторову структуру забруднення в урбанізованих зонах. Автори підкреслюють потребу у поєднанні супутникових і наземних вимірювань для підвищення точності. Створена система демонструє ефективність дистанційного зондування для екологічного моніторингу України та має значний потенціал для розвитку національних програм контролю стану повітря.

У роботі [1] автори аналізують просторові зміни ультрафіолетового аерозольного індексу (UV AI) над територією України під час воєнних дій. Зокрема, наведено карти й часові серії знімків, що показують зміни індексу над різними ділянками території України. Також наведені відомості про супутник Sentinel-5P. Ці дані можуть бути корисними для розрахунків осідання пилу на відкриті поверхні, у тому числі водосховищ.

В джерелі [58] зазначається, що після руйнації греблі Каховського водосховища територія, на якій воно було розташовано, стала місцем активного піщаного вітрового впливу. У згаданій публікації на основі супутникових даних Sentinel-5P за світлопоглинальним аерозольним індексом зафіксовані позитивні значення над колишньою акваторією водосховища. Автори вказують, що на ділянках, де раніше водосховище

існувало, зараз значення аерозольного індексу відповідають піщаним чи напівпустельним територіям через відсутність покриву рослинності й підвищену запиленість.

У статті, яка аналізує вплив кліматичних змін та промислових емісій у Дніпропетровській області [26], вказано, що у роки з високим ступенем посухи фіксується підвищене пилове навантаження, що може корелювати з підвищеним аерозольним індексом. Дослідження показує, що кліматичні чинники посилюють забруднення повітря шляхом збільшення емісії з природних джерел, а особливо з деградованих ґрунтів через розвинуте промислове виробництво, пов'язане з експлуатацією родовищ підземним чи відкритим способом. Автори роблять акцент, що для комплексного управління якістю повітря й екологічною безпекою в регіоні слід враховувати не тільки промислові викиди, але й кліматичні стреси, які можуть модулювати це забруднення.

Хоча в Україні не так багато прикладів прямих вимірювань АІ над водосховищами, ті дані, що містяться у інформаційних джерелах, свідчать про коливання аерозольного навантаження відповідно до чередування сезонів. Також значення АІ залежить від відстані розміщення водойм до джерел забруднення та від положення по відношенню до шляхів переважного напрямку вітрових потоків. Тобто, якщо водосховище знаходиться поруч із кар'єром, металургійним підприємством або автомагістраллю з трафіком дробленої гірничої маси, можна припустити, що осадження пилу буде значним під час періодів підвищення значень АІ.

Використання супутникових даних, наприклад, Sentinel-5P або інших інструментів дистанційного зондування, у поєднанні з наземними спостереженнями може слугувати методом оцінки АІ над акваторіями, що дозволяє реконструювати режими осідання пилу. Загалом для території України такі роботи проводяться, наприклад, варіація значень АІ у контексті моніторингу повітряної якості та виявлення антропогенних змін під час війни.

Безпосередньо дослідженням стану Карачунівського і Кресівського водосховищ займалися Олійник А.Ю. [39] та Борецько Є. [35].

Робота Олійник А.Ю. «Температура та індекси NDVI, NDTI, NDAI в межах Карачунівського водосховища в період з 2017 по 2023 роки» [39] присвячена екологічному моніторингу Карачунівського водосховища, що здійснювався шляхом аналізу супутникових знімків Landsat-8 та застосування геоінформаційних систем (ГІС Google Earth і QGIS) за 5 (з 2017 по 2023 рр.). Основна мета дослідження полягала у встановленні тенденцій змін ключових індексів – вегетаційного (NDVI), каламутності (NDTI) та альгоіндексу (NDAI), а також температури і площі водойми, з подальшим виявленням взаємозалежностей між цими показниками за допомогою регресійного аналізу. Актуальність теми обґрунтована критичною необхідністю прогнозування показників якості води для забезпечення екологічної безпеки Криворізького регіону.

Проведене дослідження дозволило встановити низку важливих тенденцій. Аналіз фізичних характеристик показав, що площа Карачунівського водосховища має загальну тенденцію до незначного зменшення, що може бути наслідком екологічного забруднення, антропогенного тиску та кліматичних змін. Температура поверхні водойми в період 2017-2022 років демонструвала відносну стабільність, проте у 2023 році було зафіксовано суттєве її зростання.

Динаміка індексних показників до 2023 року загалом свідчила про зростання NDVI, що вказувало на позитивні зміни у рівні рослинності. Водночас показники NDTI та NDAI демонстрували відносну стабільність або незначне зменшення, що було розцінено як відсутність значних змін у прозорості води та стабільності акваторичних екосистем.

Застосування регресійного аналізу підтвердило наявність статистично значущих взаємозв'язків:

1. Була виявлена обернена залежність між NDVI та NDTI: зростання рослинності корелює зі зменшенням каламутності, що пояснюється фільтраційними властивостями та протидією ерозії.
2. Між NDVI та NDAI також встановлено обернений зв'язок: зниження рівня рослинності асоціюється із зростанням альгоіндексу, що може свідчити про підвищену посушливість.
3. Зв'язок між NDVI та температурою виявився слабким, що вказує на вплив на вегетаційний індекс низки інших, неврахованих факторів.

Ключовим результатом роботи є фіксація негативного впливу військових дій у 2023 році. Автор однозначно констатує, що ракетні удари по греблі Карачунівського водосховища призвели до суттєвого погіршення усіх моніторингових показників: NDVI знизився, NDTI та NDAI зросли (вказуючи на збільшення каламутності, забруднення та посушливості), а температура поверхні суттєво підвищилася. Ці зміни свідчать про порушення природного балансу, пошкодження рослинності та серйозну загрозу для якості води й екологічної стабільності регіону. Загальний висновок підтверджує, що отримані дані є високодостовірними та критично важливими для подальшого вивчення й розробки стратегій збереження довкілля водосховища.

У роботі «Ретроспектива динаміки зміни значення індексу каламутності Кресівського водосховища за даними супутникових знімків» [35] здійснено ґрунтовний аналіз динаміки індексу каламутності (NDTI) Кресівського водосховища за даними супутникових платформ Sentinel-2 та Landsat 8-9, що дозволило виявити сучасні тенденції зміни прозорості води у період з 2019 до 2023 рр. Автор обґрунтовує актуальність дослідження через значну екологічну напруженість регіону та різке порушення гідрологічного режиму після підриву греблі Каховського водосховища, що потенційно могло посилити антропогенний тиск на локальні водні об'єкти. Каламутність обрана як ключовий індикатор екологічного стану, а NDTI – як один із найінформативніших спектральних показників, значення якого від -1 до 1 відображає рівень мутності води, причому значення понад 0,4 вказують на її критичне зростання.

Методологічна частина роботи включає послідовність стандартних і високоточних процедур обробки супутникових даних: відбір знімків із нульовою або мінімальною хмарністю, оконтурення акваторії водосховища, цифрове вилучення значень NDTI та температури поверхні, їх сезонне групування, графічне моделювання та статистичний аналіз. Застосовані картографічні, аналітичні та статистичні методи забезпечили комплексність оцінки динаміки оптичних властивостей води.

Отримані результати показують, що температурний режим водосховища мав виразну тенденцію до зростання у більшості сезонів, а максимальні значення зафіксовано влітку 2023 року. Натомість індекс NDTI у середньому варіював у межах 0,67-0,73, характеризуючи воду як помірно каламутну. Сезонні зміни були чітко вираженими: найвищі значення спостерігались у літній період, деяке зменшення – восени та навесні, а найнижчі – взимку. Динаміка індексу є нерівномірною, з поступовим підвищенням взимку та зниженням навесні.

Важливим результатом роботи став висновок про слабку залежність між температурою та каламутністю води, що підтверджено кореляційним коефіцієнтом $r=0,39$ та низьким значенням коефіцієнта детермінації ($R^2=0,15$). Зростання мутності, яке спостерігалось у 2022-2023 рр., автор пов'язує насамперед з локальними екологічними чинниками, такими як пилове забруднення від промислових об'єктів, зниження рівня води та посилення процесів замулення, а не з температурними змінами.

Загалом робота робить вагомий внесок у вивчення екологічного стану малих урбанізованих водосховищ, демонструючи можливості використання дистанційного зондування Землі для довгострокового моніторингу оптичних характеристик водної поверхні. Висновки дослідження мають практичне значення для оцінки екологічних ризиків, планування природоохоронних заходів і прогнозування подальших змін у водних екосистемах регіону.

Незважаючи на важливість отриманих даних А.Ю.Олійник і Є.О.Борейком, слід зазначити обмеженість робіт, а саме дослідження не включали аналіз аерозольного індексу та водного індексу NDWI. Урахування цих параметрів могло б забезпечити більш повну картину стану атмосфери над водоймою та динаміки водних мас. Також роботи надають цікаву інформацію щодо екологічного стану Карачунівського і Кресівського водосховищ на момент виконання (2023 р. включно), підкреслюючи негативні наслідки зовнішнього впливу. Врахувавши важливість постійних моніторингових досліджень стану водосховищ автор кваліфікаційної роботи, акцентував увагу на трьох показниках (AI, NDVI, NDWI) з врахуванням більш сучасного періоду з 2020 до 2025 р.

4.2. Динаміка значень аерозольного індексу (АІ)

Аналіз загальних статистичних вибірок значень АІ над водосховищами показує такі тенденції. Обидва водосховища мають доволі широкий діапазон коливань значень показнику, що свідчить про вплив спільних регіональних факторів (табл. 4.1). Наприклад, типові для окремих сезонів, пожежі, суховії, пилові бурі, викиди гірничодобувних підприємств тощо.

Пікове забруднення зафіксоване у 2023/2024 рр., коли значення АІ для обох водосховищ є найвищими – +3,00 і +3,22 (Карачунівське і Кресівське, відповідно). Сталося це 24 квітня 2024 року. Значення щільності хмар на зазначену дату становило для Карачунівського водосховища 22,34, для Кресівського 16,86. Медіанні значення цього показника за п'ятирічний період становлять, відповідно, 10,67 і 11,34, тобто є близькими. Максимальні значення для обох водосховищ однакові і становлять 250. Виявлений епізод максимального збільшення кількості аерозольних частинок у атмосфері, вірогідно обумовлений не тільки підвищенням щільності хмар, вірогідним також є такі забруднення як пилова буря чи викиди підприємств гірничодобувного комплексу, що охопили обидві досліджені території.

Таблиця 4.1

Діапазон коливань і середньорічні (медіанне значення з літа по літо – в дужках) значення аерозольного індексу над Карачунівським та Кресівським водосховищами

Назва водосховища	2020/2021 рр.	2021/2022 рр.	2022/2023 рр.	2023/2024 рр.	2024/2025 рр.
1	2	3	4	5	6
Карачунівське	-1,88÷2,20 (-0,41)	-3,12÷1,30 (-0,40)	-2,14÷1,15 (-0,42)	-1,98÷3,00 (-0,41)	-1,83÷1,36 (-0,37)
Кресівське	-1,92÷2,70 (-0,34)	-2,32÷1,31 (-0,33)	-2,50÷1,29 (-0,36)	-1,75÷3,22 (-0,34)	-1,86÷1,85 (-0,31)
2020/2025 рр.					
Карачунівське	-3,12÷3,00 (-0,41)				
Кресівське	-2,50÷3,22 (-0,33)				

Середньорічне (медіана) значення АІ над Карачунівським водосховищем є дещо нижчим (більш від'ємним) – -0,40, порівняно з

Кресівським – -0,34. Це може вказувати на слабше середньорічне фонове навантаження на атмосферу поглинаючих аерозолів над Карачунівським водосховищем. Або, навпаки, на перевагу в атмосфері над ним розсіюючих аерозолів. Також причиною такої різниці може бути відмінність у фоновому забрудненні, оскільки Карачунівське водосховище знаходиться дещо далі від основних промислових об'єктів міста Кривого Рогу, у порівнянні з Кресівським, розташованим в межах Криворізької міської територіальної громади, ближче до західної і північної промислових зон.

Тренд медіанного значення для обох водосховищ збігається – спостерігаються синхронні коливання з незначною тенденцією до збільшення показника у 2024/2025 рр. – -0,37 і -0,31 для Карачунівського і Кресівського водосховищ, відповідно. Причиною може бути зменшення розсіюючого компоненту в атмосфері, або слабого підвищення фонового (пил, дими) поглинаючого компоненту.

Загалом, можна зазначити, що атмосфера над обома водосховищами в цілому характеризується низьким фоновим рівнем поглинаючих аерозолів (від'ємні значення медіани). Наявність високих позитивних пікових значень свідчить про періодичні, але доволі інтенсивні епізоди забруднення; максимальні встановлені у 2023/2024 рр. Атмосфера над Карачунівським водосховищем демонструє більш чистіший середньорічний режим (нижча медіана), ніж над Кресівським.

Аналіз статистичних вибірок тільки позитивних або нульових значень АІ над водосховищами при щільності хмар не більше 10 показує такі тенденції (рис. 4.2, рис. 4.1).

Таблиця 4.2

Діапазон коливань і середньорічні (медіанне значення з літа по літо – в дужках) значення аерозольного індексу над Карачунівським та Кресівським водосховищами з врахуванням хмарної щільності (статистична вибірка містить тільки позитивні значення)

Назва водосховища	2020/2021 рр.	2021/2022 рр.	2022/2023 рр.	2023/2024 рр.	2024/2025 рр.
1	2	3	4	5	6
Карачунівське	0,02÷2,20 (0,36)	0,00÷1,10 (0,42)	0,01÷1,15 (0,25)	0,00÷1,71 (0,31)	0,01÷1,36 (0,23)
Кресівське	0,00÷2,70 (0,35)	0,00÷1,16 (0,30)	0,00÷1,24 (0,36)	0,02÷1,54 (0,30)	0,00÷1,03 (0,31)
2020/2025 рр.					
Карачунівське	0,00÷2,20 (0,32)				
Кресівське	0,00÷2,70 (0,32)				

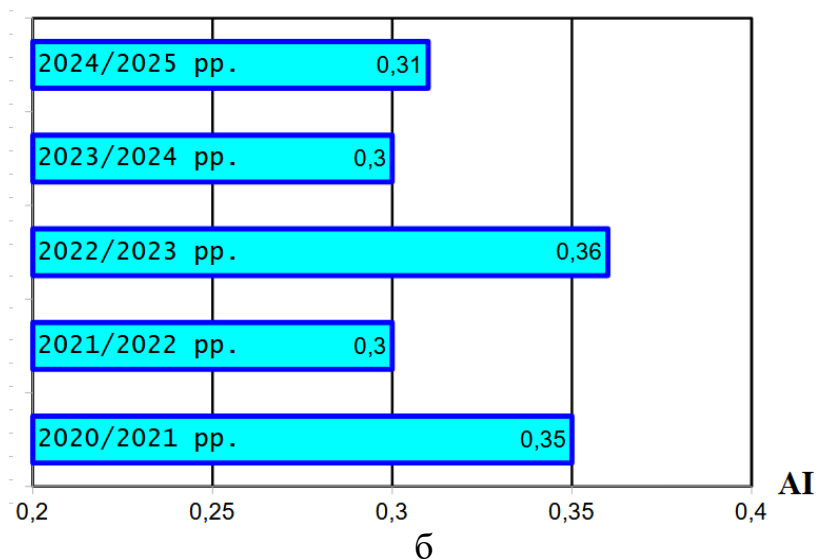
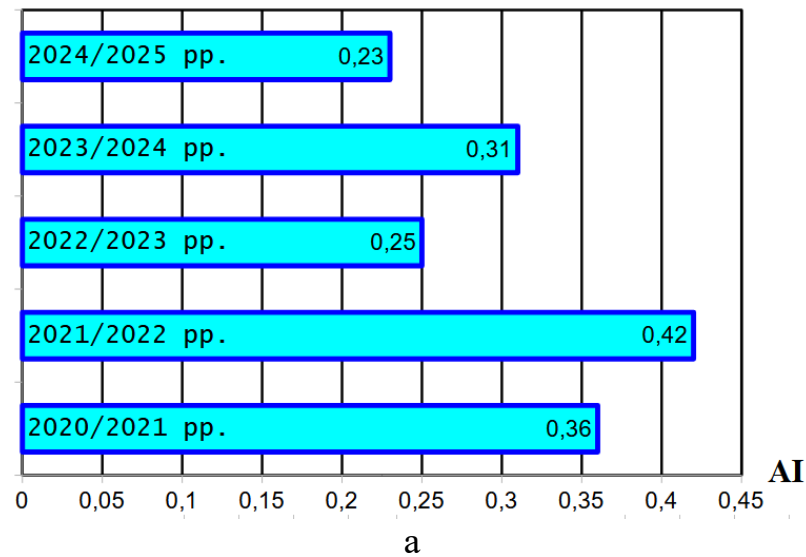


Рис. 4.1 – Коливання медіанних значень аерозольного індексу над акваторіями Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ за останні 5 років з врахуванням хмарної щільності (статистична вибірка містить тільки позитивні значення).

З 2020 по 2025 рр. над Карачунівським водосховищем спостерігається часткове очищення атмосфери. Після піку забруднення у 2021/2022 рр. ($AI=0,42$) у 2024/2025 рр. відбулося зменшення аерозольного навантаження ($AI=0,23$), що може бути пов'язано зі зменшенням пилових перенесень (природних, а також з локальних джерел забруднення). Отже, попри підвищення значення AI у 2021/2022 рр. до 0,42, загалом для атмосфери над водосховищем зберігається тенденція до зниження середньорічного рівня AI , що може свідчити про поступове зменшення постійного фонового забруднення поглинаючими аерозолями в цьому районі.

Якість повітря над Кресівським водосховищем впродовж проаналізованого періоду залишалася відносно стабільною. Медіанне річне

значення коливається в межах 0,3-0,36. Попри підвищення АІ у 2022/2023 р. – 0,36, можна говорити про тренд до зниження показника з 2020/2021 рр. до 2024/2025 рр. від 0,35 до 0,31. На користь такого висновку також свідчить найнижче (1,03) серед максимальних значень АІ, що говорить про меншу кількість поглинаючих аерозолів у пікові дні.

Отримані статистичні дані за окремими сезонами демонструють виражену відмінність значень аерозольного індексу (АІ) над Карачунівським та Кресівським водосховищами за останні 5 років. Максимальний рівень аерозольного навантаження, про що свідчать найвищі медіанні значення, спостерігається в зимовий та осінній періоди (табл. 4.3, рис.4.2). Це, ймовірно, пов'язано зі збільшенням викидів від опалювального сезону та специфічними метеорологічними умовами, які сприяють накопиченню забруднювачів. Літній період характеризується найнижчими медіанними показниками АІ, вказуючи на загальне зниження концентрації аерозолів. Найбільший діапазон коливань (пікові значення) для обох водосховищ фіксується саме восени, що може бути результатом неперіодичних інтенсивних подій, наприклад, індустриальні викиди, в меншій мірі пожежі, забруднення від яких швидко розсіюються.

Таблиця 4.3

Діапазон коливань і середньорічні (медіана) значення аерозольного індексу над Карачунівським та Кресівським водосховищами в різні сезони за останні 5 років з врахуванням хмарної щільності (статистична вибірка містить тільки позитивні значення)

Назва водосховища	літо	осінь	зима	весна
1	2	3	4	5
Карачунівське	0,00÷0,88 (0,19)	0,02÷2,20 (0,41)	0,17÷1,29 (0,49)	0,00÷1,71 (0,27)
Кресівське	0,00÷1,03 (0,25)	0,00÷2,70 (0,36)	0,01÷0,95 (0,42)	0,01÷1,71 (0,28)

Найвищі пікові значення АІ над акваторіями обох водосховищ встановлені восени – 2,20 (Карачунівське) і 2,70 (Кресівське).

Карачунівське водосховище має найвище медіанне значення АІ в зимовий період (0,49), що типово і для Кресівського водосховища (0,42). Найнижчі медіани характерні для літнього сезону – 0,19 (Карачунівське) і 0,25 (Кресівське), що вказує на загальну меншу концентрацію поглинаючих аерозолів, при незначній різниці у діапазоні коливань значень. Весняні медіанні значення АІ дуже близькі для обох водосховищ (0,27 та 0,28, відповідно Карачунівське та Кресівське), а максимальні діапазони ідентичні (1,71), що може відображати схожість метеорологічних умов та джерел викидів поглинаючих аерозолів у цей період.

Додатково встановлено, що динаміка сезонних змін АІ для обох досліджуваних водосховищ має однаковий загальний характер, однак спостерігаються певні кількісні відмінності. Зокрема, для Карачунівського водосховища значення АІ є вищими в літній період, тоді як для Кресівського — навпаки, більш виражене зниження фіксується влітку. Це свідчить про наявність локальних мікрокліматичних та антропогенних чинників, що по-різному впливають на інтенсивність аерозольного забруднення в межах кожного водного об'єкта.

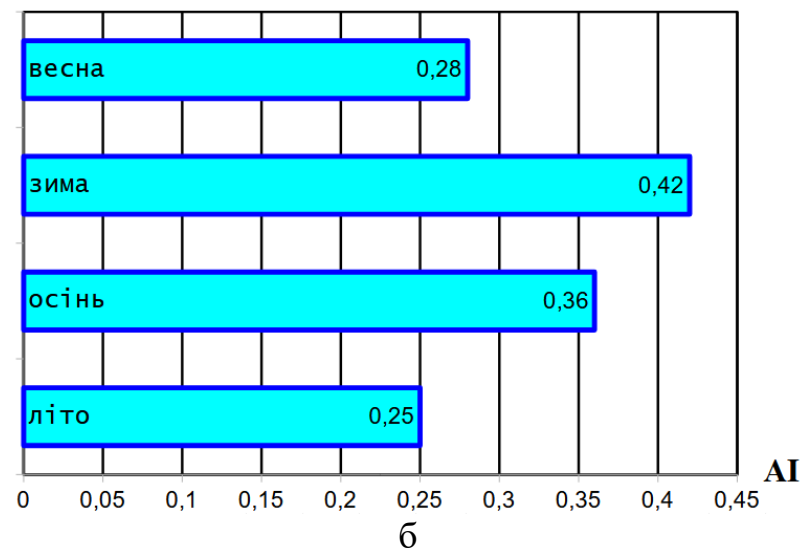
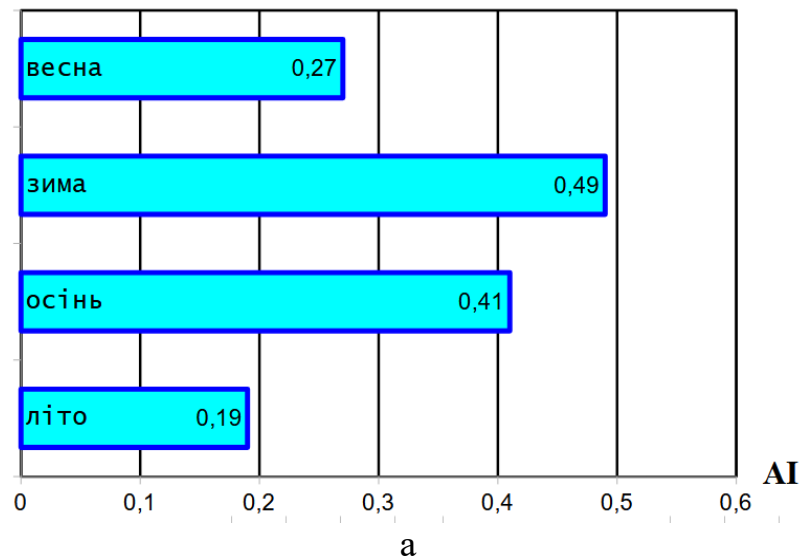


Рис. 4.2. Коливання медіанних значень аерозольного індексу над акваторіями Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ з врахуванням хмарної щільності (статистична вибірка містить тільки позитивні значення), згруповані по сезонах за останні 5 років.

4.3. Динаміка значень нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI)

Карачунівське водосховище характеризується високою річною амплітудою значень NDVI. У 2020/2021 рр. відмічена найширший діапазон значень ($-1,88 \div 0,12$, з медіаною $-0,10$) – табл. 4.4., рис. 4.3. Це вказує на значну річну різницю – від чистої води до ділянок слабого цвітіння. В подальші роки ширина інтервалу значень стала вужчою. У 2021/2022 рр. діапазон значень коливається від $-0,68$ до $-0,06$, а медіанне значення стало $-0,20$, що свідчить про подальше зниження цвітіння води. У 2022/2023 рр. спостерігається деяке погіршення вод, оскільки значення NDVI коливаються від $-0,31$ до $0,06$, з медіанним показником $-0,17$, що в меншій мірі відповідає областям відкритої води. Проте в 2023/2024 рр. значення показника знижується до діапазону $-0,80$ до $0,00$, з медіанним значенням $-0,18$, що вказує на зниження вегетаційних процесів у водоймі. У 2024/2025 рр. діапазон значень NDVI становить $-0,64$ до $0,00$, а медіанне значення $-0,10$, що свідчить про відносну стабільність стану води, хоча середнє значення стало вищим порівняно з попереднім роком, проте залишається від'ємним. Загалом, Карачунівське водосховище демонструє постійно від'ємні значення, що свідчить про нестабільний стан цвітіння вод, особливо в 2020/2021 та 2021/2022 роках.

Таблиця 4.4

Діапазон коливань і середньорічні (медіанне значення з літа по літо – в дужках) значення NDVI в межах Карачунівського та Кресівського водосховищ з врахуванням 0% хмарності

Назва водосховища	2020/2021 рр.	2021/2022 рр.	2022/2023 рр.	2023/2024 рр.	2024/2025 рр.
1	2	3	4	5	6
Карачунівське	$-1,88 \div 0,12$ ($-0,10$)	$-0,68 \div -0,06$ ($-0,20$)	$-0,31 \div 0,06$ ($-0,17$)	$-0,80 \div 0,00$ ($-0,18$)	$-0,64 \div 0,00$ ($-0,10$)
Кресівське	$-0,17 \div 0,19$ ($-0,03$)	$-0,49 \div 0,22$ ($-0,12$)	$-0,74 \div 0,19$ ($-0,07$)	$-0,74 \div 0,09$ ($-0,03$)	$-0,54 \div 0,16$ ($0,00$)
2020/2025 рр.					
Карачунівське	$-0,80 \div 0,06$ ($-0,12$)				
Кресівське	$-0,74 \div 0,22$ ($-0,02$)				

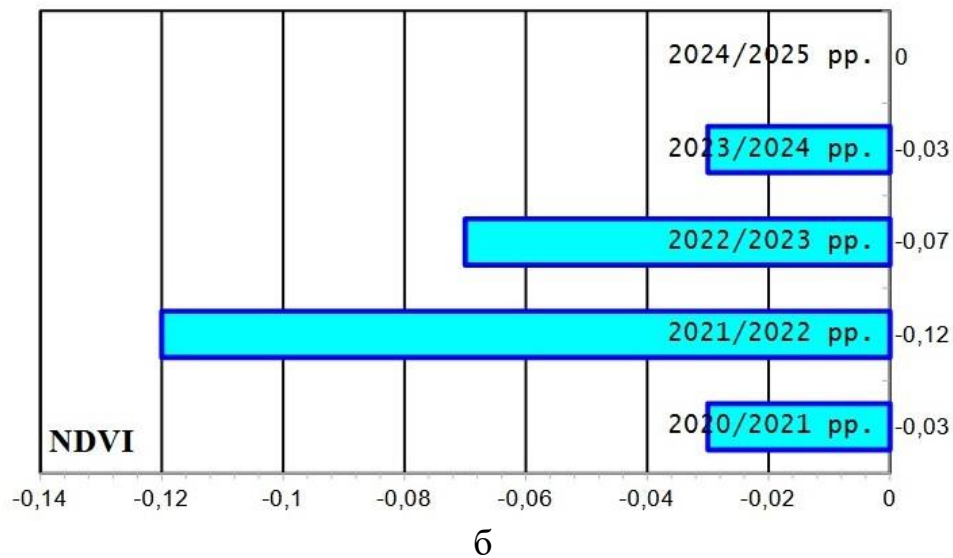
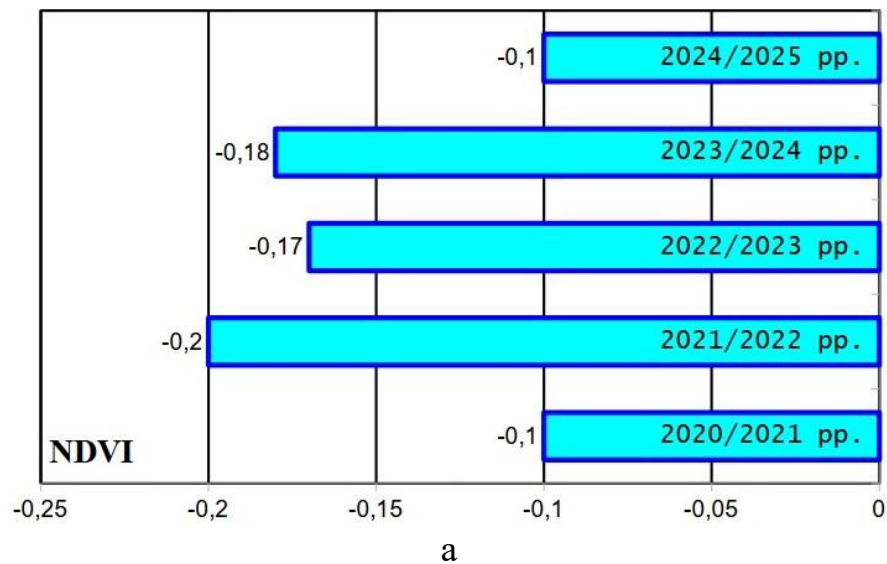


Рис. 4.3. Коливання медіанних значень NDVI в межах акваторій Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ за останні 5 років.

Аналіз значень NDVI для Кресівського водосховища за період з 2020 по 2025 роки показує більш позитивні тенденції в стані цвітіння. У 2020/2021 рр. діапазон значень NDVI варіюється від -0,17 до 0,19, з медіаною -0,03, що вказує на помірний розвиток рослинності. У 2021/2022 рр. спостерігається деяке зниження, оскільки діапазон значень коливається від -0,49 до 0,22, а медіанне значення стає -0,12. У 2022/2023 рр. значення NDVI коливаються від -0,74 до 0,19, з медіанним показником -0,07, що свідчить про значну різноманітність у стані вегетації, але все ще з від'ємними значеннями. У 2023/2024 рр. ситуація залишається схожою, з діапазоном значень від -0,74 до 0,09 і медіанним значенням -0,03, показуючи незначне збільшення цвітіння. У 2024/2025 рр. діапазон значень NDVI досягає -0,54 до 0,16, а медіанне значення стає 0,00, що вказує на збільшення рівня цвітіння води. Таким чином, Кресівське водосховище демонструє гірші тенденції у стані цвітіння води, особливо в 2024/2025 рр., що свідчить про сильніший

негативний антропогенний вплив, оскільки воно розташоване у більш урбанізованому місці, ніж Карачунівське водосховище. Медіанні значення індексу загалом за 5 років також показують кращий стан вод Карачунівського водосховища – менше від’ємне значення.

Аналіз значень NDVI над Карачунівським та Кресівським водосховищами за останні п’ять років у різні сезони показав на суттєві відмінності в стані вегетації в межах обох об’єктів (табл. 4.5, рис. 4.4).

Таблиця 4.5

Діапазон коливань і середньорічні (медіана) значення NDVI над Карачунівським та Кресівським водосховищами в різні сезони за останні 5 років з врахуванням з врахуванням 0% хмарності

Назва водосховища	літо	осінь	зима	весна
1	2	3	4	5
Карачунівське	-0,34÷0,06 (-0,10)	-0,80÷0,00 (-0,18)	-0,64÷0,06 (-0,17)	-0,33÷0,00 (-0,09)
Кресівське	-0,74÷0,19 (0,01)	-0,35÷0,19 (0,02)	-0,67÷0,03 (-0,23)	-0,51÷0,22 (-0,12)

Упродовж останніх п’яти років значення NDVI над Карачунівським та Кресівським водосховищами демонструють виразні сезонні відмінності, що відображають специфіку морфологічної будови водойм, їхню гідрологічну динаміку та біологічну продуктивність. Загалом обидва водосховища характеризуються переважно негативними значеннями NDVI, що є типовим для відкритих водних поверхонь; проте поведінка індексу вказує на різний ступінь розвитку водної рослинності, різну частку мілководних ділянок та варіації у прозорості води.

У літній період Карачунівське водосховище демонструє діапазон NDVI від -0,34 до 0,06 при медіані -0,10, що відповідає умовам відносно чистої та глибшої водної товщі з мінімальним розвитком макрофітів (крупні багатоклітинні водорості). На відміну від нього, у Кресівському водосховищі літні значення варіюють від -0,74 до 0,19, а медіанне значення становить 0,01. Поява позитивних значень свідчить про наявність ділянок зі зростанням макрофітів або про більш інтенсивну суспензію, яка збільшує відбиття в ближній інфрачервоній області. Це вказує на вищу літню біологічну активність у порівнянні з Карачунівським.

Восени в обох водоймах спостерігається зниження NDVI, що природно пов’язано зі спадом біомаси водної рослинності та зменшенням температури води. Для Карачунівського водосховища характерний широкий негативний діапазон від -0,80 до 0,00 та медіана -0,18, що робить осінь сезоном з найнижчими значеннями NDVI для цієї водойми. Натомість Кресівське водосховище в осінній період зберігає ширший діапазон (-0,35÷0,19) та

демонструє медіанне значення 0,02, що свідчить про довше збереження рослинності або вищу мутність у порівнянні з Карачунівським.

У зимовий період обидві водойми мають значення NDVI, характерні для відкритої води або води під льодовим покривом, що відображається негативними значеннями індексу. Для Карачунівського водосховища діапазон становить $-0,64 \div 0,06$ при медіані $-0,17$, тоді як для Кресівського водосховища – $-0,67 \div 0,03$ при медіані $-0,23$. Нижча медіана у Кресівському може бути пов'язана з темнішою водною поверхнею, меншою прозорістю або відмінностями у льодовому режимі внаслідок морфометричних характеристик водойми.

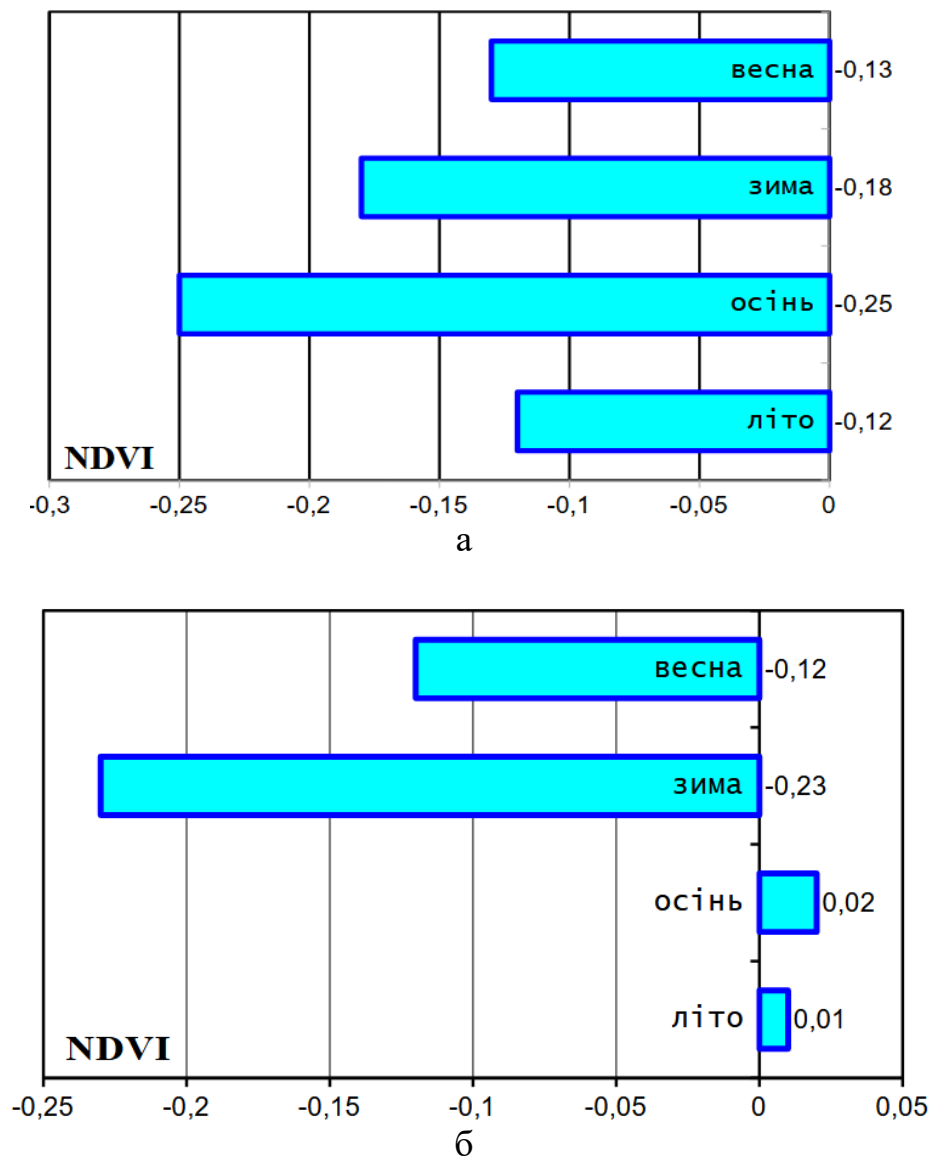


Рис. 4.4. Коливання медіанних значень NDVI в межах акваторій Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ з врахуванням хмарної щільності (статистична вибірка містить тільки позитивні значення), згруповані по сезонах за останні 5 років.

Навесні значення NDVI в обох водосховищах зростають, що відображає сезонне відновлення гідрофітної рослинності та збільшення освітленості. Для Карачунівського водосховища характерний діапазон $-0,33 \div 0,00$ і медіана $-0,09$, що вказує на помірне весняне підвищення NDVI без появи виражено позитивних значень. У Кресівському водосховищі весняні значення коливаються від $-0,51$ до $0,22$, а медіанне значення становить $-0,12$. Поява позитивних індексів уже на початку сезону свідчить про активніше раннє заростання мілководдя або підвищений вміст органічної суспензії.

Узагальнюючи, Карачунівське водосховище характеризується стабільно негативними, ближчими до типових «водних» значеннями NDVI, що відображає його більшу глибину, чистішу воду та менший розвиток рослинності. Кресівське водосховище в усі сезони демонструє ширший діапазон NDVI та часті позитивні значення, що свідчить про вищу біологічну продуктивність, значні площі мілководдя та можливу більшу мутність води. Такі відмінності підкреслюють різну екологічну динаміку та морфологічну специфіку обох водойм.

4.4. Динаміка значень нормалізованого диференційного індексу вологості (NDWI)

Упродовж 2020-2025 рр. обидва водосховища демонструють характерні коливання значень NDWI, що відображають зміну водності, рівневого режиму, прозорості води та сезонної гідрологічної динаміки. Значення NDWI, які зазвичай коливаються від негативних до значно позитивних, дозволяють оцінити ступінь насиченості водою та стабільність водної поверхні. На відміну від NDVI, цей індекс більш чітко реагує на зміни у водному балансі, зокрема на коливання рівня води, затоплення мілководь та зміни площ відкритої води.

У період 2020-2025 рр. Карачунівське водосховище демонструє стабільно високі значення NDWI верхньої межі, яка в окремі роки досягає $0,83-0,88$ (табл. 4.6, рис. 4.5), що свідчить про велику частку відкритої водної поверхні та високу водність у більшості сезонів. Діапазон індексу розширюється від позитивних до часом слабо від'ємних значень (мінімум $-0,07$ у 2022/2023 рр.), що вказує на можливі періоди оголення мілководдя, сезонні спади рівнів або зміни у прозорості води. Медіанні значення за роками варіюють від $0,21$ до $0,33$, з піком у 2021/2022 та 2022/2023 рр., що відображає стабільний стан водного дзеркала. Узагальнений медіанний показник за 2020-2025 рр. становить $0,28$, що підтверджує загалом високу водність і гідрологічну стабільність Карачунівського водосховища протягом усього аналізованого періоду.

Для Кресівського водосховища характерна більша мінливість значень NDWI як у межах окремих років, так і поміж них. Діапазон коливань

змінюється від нижніх негативних значень (мінімум -0,28 у 2021/2022 рр.) до значно позитивних (верхня межа 0,83 у 2023/2024 рр.). Така динаміка свідчить про більшу чутливість водойми до сезонних та міжрічних коливань рівня води, можливе часте оголення мілководних ділянок, а також зміни у прозорості води чи ступені заростання прибережної зони. Медіанні значення NDWI коливаються від 0,10 до 0,28, демонструючи помітну міжрічну варіативність гідрологічного стану. В середньому за 2020-2025 рр. медіана становить 0,20, що є нижчим за відповідний показник для Карачунівського водосховища і відображає меншу стабільність водного дзеркала та більший вплив сезонних факторів.

Таблиця 4.6

Діапазон коливань і середньорічні (медіанне значення з літа по літо – в дужках) значення NDWI в межах Карачунівського та Кресівського водосховищ з врахуванням 0% хмарності

Назва водосховища	2020/2021 рр.	2021/2022 рр.	2022/2023 рр.	2023/2024 рр.	2024/2025 рр.
1	2	3	4	5	6
Карачунівське	0,11÷0,75 (0,26)	0,11÷0,81 (0,32)	-0,07÷0,83 (0,33)	0,06÷0,88 (0,33)	0,05÷0,72 (0,21)
Кресівське	-0,05÷0,39 (0,10)	-0,28÷0,60 (0,28)	0,07÷0,76 (0,27)	0,03÷0,83 (0,20)	-0,11÷0,62 (0,16)
2020/2025 рр.					
Карачунівське	-0,07÷0,88 (0,28)				
Кресівське	-0,28÷0,83 (0,20)				

Порівняння обох водойм показує, що Карачунівське водосховище характеризується вищими середньорічними NDWI, меншим розмахом коливань мінімальних значень та стабільно високою верхньою межею NDWI. Це свідчить про більшу гідрологічну стійкість, значну частку постійного водного дзеркала та меншу залежність від сезонних змін. Кресівське водосховище, навпаки, демонструє значно ширший діапазон NDWI (-0,28÷0,83), більш виражені негативні значення та нижчі медіанні показники. Така динаміка вказує на складніший сезонний режим, більший вплив мілководдя, періодичні зміни рівня води та можливий розвиток прибережної рослинності, що може змінювати спектральний відгук водної поверхні.

Протягом останніх п'яти років сезонна динаміка NDWI над Карачунівським та Кресівським водосховищами демонструє чітко виражені відмінності, що відображають специфіку їхнього гідрологічного режиму, морфометричних характеристик та сезонних змін площі водного дзеркала. Загалом у межах обох водойм спостерігається широкий діапазон значень

NDWI — від слабо негативних до високих позитивних величин, що є типовим для поєднання відкритої водної поверхні, мілководних ділянок та зони перемінного зволоження. Проте тенденції зміни індексу упродовж сезонів суттєво відрізняються між водосховищами, що дає змогу оцінити особливості їхніх гідроекологічних процесів.

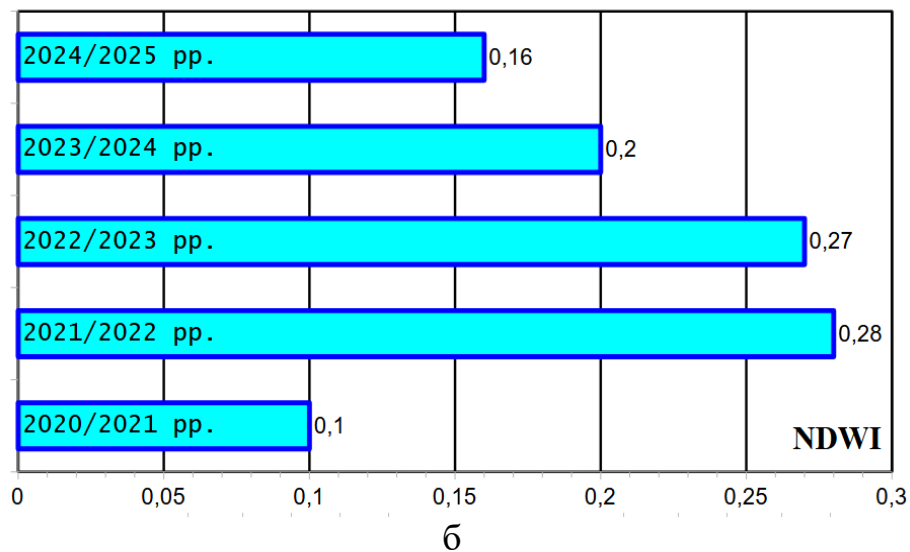
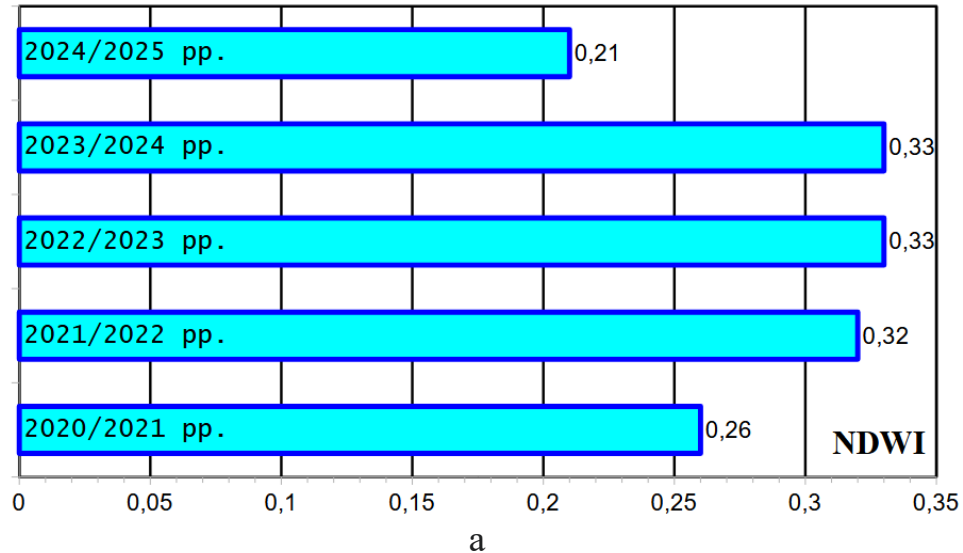


Рис. 4.5. Коливання медіанних значень NDWI в межах акваторій Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ за останні 5 років.

У літній період Карачунівське водосховище характеризується діапазоном значень NDWI від -0,07 до 0,75 та медіанним значенням 0,26 (табл. 4.7, рис. 4.6), що свідчить про переважання відкритої водної поверхні за умов відносно стабільного рівневого режиму. Для Кресівського водосховища у цей сезон зафіксовано ширший діапазон (-0,18÷0,77) та нижчу медіану (0,18), що може бути наслідком більшої частки мілководдя, сезонного заростання прибережних ділянок або локальних знижень рівня води, які формують значно гетерогенну структуру водної поверхні.

Таблиця 4.7

Діапазон коливань і середньорічні (медіана) значення NDWI над Карачунівським та Кресівським водосховищами в різні сезони за останні 5 років з врахуванням з врахуванням 0% хмарності

Назва водосховища	літо	осінь	зима	весна
1	2	3	4	5
Карачунівське	-0,07÷0,75 (0,26)	0,05÷0,88 (0,33)	0,02÷0,83 (0,34)	0,06÷0,55 (0,24)
Кресівське	-0,18÷0,77 (0,18)	-0,11÷0,51 (0,17)	-0,05÷0,71 (0,28)	-0,28÷0,83 (0,28)

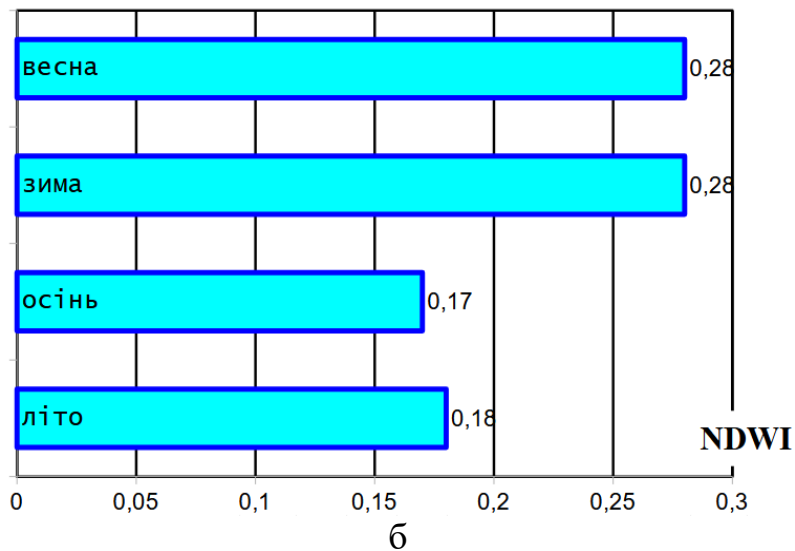
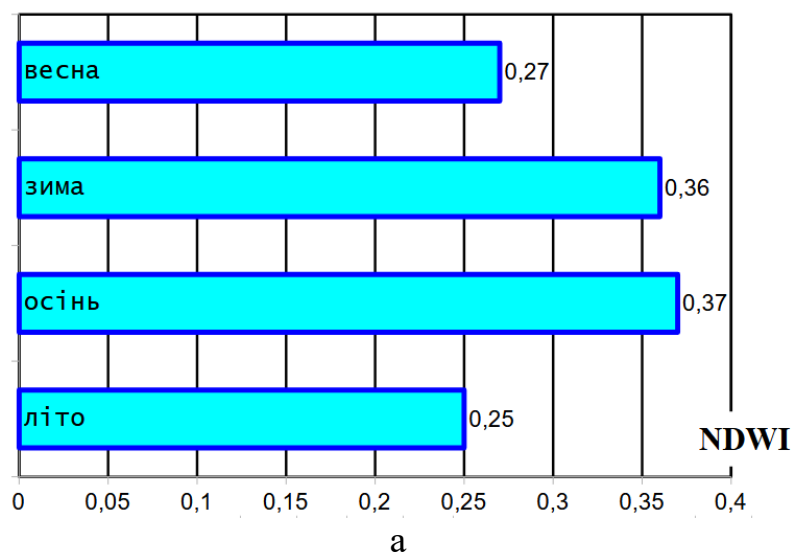


Рис. 4.6. Коливання медіанних значень NDWI в межах акваторій Карачунівського (а) і Кресівського (б) водосховищ з врахуванням хмарної щільності (статистична вибірка містить тільки позитивні значення), згруповані по сезонах за останні 5 років.

Восени значення NDWI в обох водоймах зростають, проте більш помітно – у Карачунівському водосховищі. Широкий діапазон від 0,05 до 0,88 та медіана 0,33 свідчать про сезонне підвищення рівня води та зміщення межі водного дзеркала. Натомість у Кресівському водосховищі осінні значення коливаються в межах $-0,11 \div 0,51$, а медіана становить 0,17, що вказує на менш виражене осіннє водонасичення та збереження мілководних ділянок, які знижують загальний спектральний відгук води.

У зимовий період обидві водойми демонструють характерне зростання значень NDWI, що пов'язано з вирівнюванням водного дзеркала, зменшенням біомаси рослинності та формуванням більш однорідної поверхні води або льоду. Для Карачунівського водосховища значення змінюються в межах $0,02 \div 0,83$, а медіана досягає 0,34 – найвищого сезонного показника серед усіх сезонів. Кресівське водосховище також демонструє підвищені значення ($-0,05 \div 0,71$), проте медіанний NDWI є нижчим (0,28), що вказує на збереження певної неоднорідності водної поверхні, ймовірно, через різноманітність умов льодоутворення або часткове оголення прибережної зони.

Навесні у Карачунівському водосховищі діапазон NDWI становить $0,06 \div 0,55$, а медіана – 0,24, що свідчить про поступове відновлення водності після зимового максимуму та формування стабільної водної поверхні. У Кресівському водосховищі навесні діапазон значно ширший ($-0,28 \div 0,83$) і супроводжується медіаною 0,28. Це свідчить про виражену контрастність весняних умов: від оголення мілководдя до періодів високого рівня, що призводить до значних спектральних варіацій NDWI.

Узагальнюючи, Карачунівське водосховище демонструє більш стабільний гідрологічний режим та вищі середньосезонні значення NDWI, особливо в осінньо-зимовий період, що вказує на стійкість водного дзеркала та мінімальний вплив мілководних зон. Кресівське водосховище, навпаки, характеризується значно мінливішим спектральним профілем, ширшими діапазонами сезонних коливань і нижчими медіанами влітку та восени, що відображає більшу гідрологічну динамічність та чутливість до сезонних змін рівня води. Ці особливості підкреслюють істотні відмінності у морфологічній будові та гідроекологічній поведінці обох водойм.

Висновки за 4 розділом

Аналіз загальних (без фільтрації) статистичних вибірок значень аерозольного індексу над Карачунівським та Кресівським водосховищами за 5-річний період (2020-2025 рр.) демонструє, що атмосфера над обома акваторіями загалом характеризується низьким фоновим рівнем поглинаючих аерозолів, про що свідчать від'ємні середньорічні (медіанні) значення. Водночас, виявлений широкий діапазон коливань AI та наявність

високих позитивних пікових значень $+3,00$ і $+3,22$ (Карачунівське і Кресівське, відповідно), свідчать про вплив спільних регіональних факторів (таких як пилові бурі, пожежі, викиди гірничодобувних підприємств), що зумовлюють періодичні, але інтенсивні епізоди забруднення.

Порівняльний аналіз середньорічних та пікових показників над Карачунівським водосховищем демонструє чистіший середньорічний режим (більш від'ємна медіана ($AI=-0,40$), порівняно з Кресівським ($AI=-0,34$)). Ця різниця, ймовірно, пов'язана з географічним положенням Карачунівського водосховища, що знаходиться на більшій відстані від основних промислових об'єктів міста Кривого Рогу, тоді як Кресівське розташоване ближче до промислових зон. Загальний тренд медіанного значення для обох водних об'єктів синхронний, із незначною тенденцією до збільшення показника у 2024/2025 рр.

Найвищий рівень забруднення зафіксовано 24 квітня 2024 року, коли значення AI досягли пікових позначок: $+3,00$ (Карачунівське) та $+3,22$ (Кресівське). Імовірно, ця подія була обумовлена комбінованим впливом високої щільності хмар та потужних викидів, таких як пилова буря або антропогенні викиди гірничодобувного комплексу.

У 2020-2025 рр. над Карачунівським та Кресівським водосховищами простежується загальна тенденція до зниження аерозольного навантаження, проте динаміка процесів відрізняється. Для Карачунівського водосховища характерне помітніше очищення атмосфери: після піку забруднення у 2021/2022 рр. ($AI=0,42$) показник у 2024/2025 рр. зменшився майже вдвічі – до $AI=0,23$. Це може бути пов'язано зі зниженням пилових перенесень як природного, так і антропогенного походження. Натомість над Кресівським водосховищем якість повітря залишалася відносно стабільною – медіанне річне значення AI коливалося в межах $0,3-0,36$, із поступовим спадом від $0,35$ до $0,31$ за досліджуваний період. Крім того, найнижче серед максимальних значень ($AI=1,03$) свідчить про меншу кількість поглинаючих аерозолів у пікові дні порівняно з попередніми роками. Загалом, Карачунівське водосховище демонструє чіткіший тренд до очищення атмосфери, тоді як над Кресівським зберігається стабільно помірний рівень забруднення.

Сезонна динаміка аерозольного навантаження має виражену відмінність у розподілі значень AI .

- Максимальний рівень (найвищі медіанні значення) спостерігається у зимовий та осінній періоди. Це пов'язано зі збільшенням викидів, спричинених опалювальним сезоном, та специфічними метеорологічними умовами, що сприяють накопиченню забруднювачів в атмосфері.
- Мінімальна концентрація поглинаючих аерозолів (найнижчі медіанні показники) характерна для літнього періоду (від $0,19$ до $0,25$).
- Динаміка сезонних змін AI має однаковий загальний характер для обох водосховищ, проте існують кількісні відмінності, що вказує на наявність локальних мікрокліматичних та антропогенних факторів, які

по-різному впливають на інтенсивність аерозольного забруднення в межах кожного водного об'єкта.

Аерозольне забруднення над Карачунівським та Кресівським водосховищами має комбінований характер, де низький середньорічний фон порушується періодичними інтенсивними епізодами регіонального походження. Якість повітря над Карачунівським водосховищем є в середньому кращою, що корелює з його більшою віддаленістю від промислових джерел.

Узагальнений аналіз просторово-часової динаміки значень NDVI в межах акваторій Карачунівського та Кресівського водосховищ за п'ятирічний період показує суттєві відмінності в стані їхньої водної рослинності, прозорості та біологічної продуктивності. Карачунівське водосховище стабільно демонструє переважно від'ємні значення NDVI з відносно вузькими діапазонами упродовж останніх років, що вказує на чистішу та глибшу водну товщу та мінімальний розвиток макрофітів. Найбільша амплітуда показника, зафіксована у 2020/2021 рр., свідчить про значні коливання стану води, однак подальше звуження діапазону вказує на відносну стабілізацію екологічних умов. Кресівське водосховище характеризується ширшими діапазонами та частішими позитивними значеннями NDVI, що відображає значні площі мілководдя, вищу біологічну активність і більшу мутність води. Сезонні зміни також підтверджують відмінності між водоймами: Карачунівське зберігає типові для відкритих вод негативні значення, тоді як Кресівське демонструє виразніші піки біологічної продуктивності влітку та навесні. Взимку обидва водосховища мають подібні негативні значення NDVI, проте нижчі медіанні значення в Кресівському свідчать про меншу прозорість та інші гідрологічні особливості. Загалом Карачунівське водосховище відзначається стабільнішим екологічним станом та меншою схильністю до цвітіння води. Натомість Кресівське водосховище демонструє вищу мінливість показників NDVI, що може бути зумовлено урбанізаційним впливом і специфічними морфометричними характеристиками.

За показником NDWI Карачунівське водосховище демонструє стабільно високі значення та мінімальні міжрічні коливання, що свідчить про сталий рівневий режим і домінування відкритої водної поверхні. Кресівське водосховище виявляє значну варіативність NDWI, що вказує на активні сезонні коливання його водності, більшу частку мілководних ділянок та чутливість до гідрологічних змін.

Узагальнені (у цілому за 5 років) значення NDWI за 2020-2025 рр. показують: 1) Карачунівське водосховище – від $-0,07 \div 0,88$ (медіана 0,28); 2) Кресівське – $-0,28 \div 0,83$ (медіана 0,20), що чітко демонструє вищу водність та стабільність Карачунівського водосховища порівняно з більш динамічним та мінливим Кресівським.

Отримані результати підкреслюють різний екологічний режим водойм і важливість їхнього окремого моніторингу.

ВИСНОВКИ

Екологічний стан усіх водних об'єктів Криворіжжя, зокрема Карачунівського і Кресівського водосховищ, є результатом комплексної взаємодії інтенсивної індустриальної діяльності (гірничодобувної та металургійної) та глобальних кліматичних процесів. Обидва водосховища перебувають під високим антропогенним тиском (промислові та побутові стоки, діяльність кар'єрів), що спричиняє евтрофікацію та погіршення якості води. Крім того, Карачунівське водосховище зазнало техногенних ризиків та впливу надзвичайних подій (ракетні обстріли 2022 р.). Ефективний моніторинг і управління цими водоймами критично залежить від методів ГІС та Дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

1. Аналіз аерозольного індексу (AI) за 2020-2025 рр. показав, що атмосфера над обома водоймами має низький фоновий рівень поглинаючих аерозолів (від'ємні медіанні значення: Карачунівське AI=-0,40; Кресівське AI=-0,34). Однак, цей фон періодично порушується інтенсивними епізодами забруднення (пікові значення до +3,00÷+3,22), спричиненими спільними регіональними факторами, такими як пилові бурі, пожежі та викиди гірничодобувних підприємств.

2. Карачунівське водосховище демонструє чистіший середньорічний режим, що, ймовірно, пов'язано з його більшою віддаленістю від основних промислових об'єктів міста. Над Карачунівським водосховищем спостерігається чіткіший тренд до очищення атмосфери у 2024/2025 рр. (зниження піку забруднення 2021/2022 рр. майже вдвічі). Над Кресівським якість повітря залишається стабільно помірною.

3. Максимальний рівень забруднення характерний для зимового та осіннього періодів (опалювальний сезон, метеорологічні умови), мінімальний – для літнього.

4. Просторово-часова динаміка вегетаційного індексу (NDVI) та водного індексу (NDWI) підкреслює суттєві відмінності в екологічному режимі водосховищ. Карачунівське водосховище характеризується стабільно від'ємними значеннями NDVI та вузькими діапазонами. Це свідчить про чистішу, глибшу водну товщу та мінімальний розвиток макрофітів (стабільніший екологічний стан, менша схильність до цвітіння). Кресівське водосховище характеризується ширшими діапазонами та частішими позитивними значеннями NDVI, що відображає наявність значних мілководних ділянок, вищу біологічну продуктивність та більшу мутність води (вища мінливість показників через урбанізаційний вплив).

5. Водний індекс (NDWI) в межах Карачунівського водосховища демонструє стабільно високі значення (медіана 0,28) з мінімальними коливаннями, що вказує на сталий рівневий режим і домінування відкритої водної поверхні. Кресівське водосховище характеризується значною варіативністю NDWI (медіана 0,20), що свідчить про активні сезонні коливання водності, чутливість до гідрологічних змін та більшу частку мілководдя.

6. Загалом результати дослідження демонструють, що Карачунівське водосховище перебуває у більш стабільному гідроекологічному стані, з меншими проявами цвітіння води та нижчим рівнем варіабельності спектральних показників. Натомість Кресівське водосховище характеризується вищою динамічністю та тенденцією до збільшення інтенсивності цвітіння, що може бути індикатором зростаючого антропогенного навантаження та екологічних ризиків.

7. Обидва водосховища потребують інтегрованого управління водними ресурсами через високий рівень антропогенного та геоекологічного впливу. Карачунівське водосховище, як джерело питної води, демонструє кращий, але вразливий екологічний стан, тоді як Кресівське водосховище є більш мінливим та чутливим до локальних промислових факторів. Методи ГІС та ДЗЗ підтверджують достовірність цих висновків і є необхідним інструментом для оперативного моніторингу та вжиття заходів щодо запобігання подальшому погіршенню якості води.