

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

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

Тема роботи
**«Гідрогеологічна інтерпретація змін водного та вегетаційного індексів у
межах шламосховища ПРАТ ЦГЗК»**

Виконала здобувачка групи НЗГ-22
Науковий керівник
Нормоконтролер
В.о. завідувача кафедри

Катерина ХОДИКІНА
Віталій ХАРИТОНОВ
Олександр ТРУНІН
Світлана ПАНОВА

Кривий Ріг
2026

Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра геології та екології

Ступінь вищої освіти: перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
Спеціальність: 103 Науки про Землю ОПП Геологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри _____ Світлана ПАНОВА

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну (бакалаврську) роботу

Ходикіної Катерини Сергіївни

1. Тема: «Гідрогеологічна інтерпретація змін водного та вегетаційного індексів у межах шламосховища ПРАТ ЦГЗК»

Затверджена наказом по КНУ № 107с від «19 лютого» 2026 р.

2. Термін подання здобувачем закінченої роботи: «.....» 2026 р.
3. Вихідні дані по кваліфікаційній бакалаврській роботі: літературні та електронні джерела; супутникові знімки космічного апарату Sentinel-2; програмне забезпечення для статистичного аналізу Excel; розрахункові показники.
4. Зміст пояснювальної записки: - вступ;- розділ 1 Теоретичні основи гідрогеологічних досліджень техногенних об'єктів; розділ 2 Характеристика району дослідження (ПРАТ «ЦГЗК»); розділ 3 Методика та інформаційна база дослідження; розділ 4 Аналіз змін водного та вегетаційного індексів; розділ 5 Гідрогеологічна інтерпретація отриманих результатів; висновки; список літератури.
5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал наведений у презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Харитонов В.М.	19.02.2026	01.03.2026
2	Харитонов В.М.	01.03.2026	14.03.2026
3	Харитонов В.М.	14.03.2026	05.04.2026
4	Харитонов В.М.	05.04.2026	17.04.2026
5	Харитонов В.М.	17.04.2026	23.05.2026

7. Календарний план

Етапи роботи	Термін виконання
Написання розділу 1 Теоретичні основи гідрогеологічних досліджень техногенних об'єктів	19.02.2026 30.02.2026
Написання розділу 2 Характеристика району дослідження (ПРАТ «ЦГЗК»)	01.03.2026 12.03.2026
Написання розділу 3 Методика та інформаційна база дослідження	14.03.2026 03.04.2026
Написання розділу 4 Аналіз змін водного та вегетаційного індексів	05.04.2026 15.04.2026
Написання розділу 5 Гідрогеологічна інтерпретація отриманих результатів	17.04.2026 23.05.2026
Написання розділів «Реферат», «Вступ», «Висновки», «Список використаних джерел».	23.05.2026 04.06.2026

Дата видачі завдання «19» лютого 2026 р.

Завдання видав

науковий керівник

Завдання отримала

здобувачка

Віталій ХАРИТОНОВ

Катерина ХОДИКІНА

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота: с, 4 рис., 1 табл., 2 граф., 7 джерел,

Ця робота досліджує, як діяльність шламосховища ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» впливає на водний режим та рослинність навколишньої території. Для цього використовувалися супутникові знімки, за допомогою яких аналізувалися два важливі показники: NDVI та NDWI. Ці індекси допомагають зрозуміти, наскільки здорова рослинність і які зміни відбуваються з водою на цій ділянці. Вчені також врахували природні умови регіону, геологію та особливості підземних вод, а також те, як саме шламосховище змінює водний баланс і впливає на рослини та сусідні землі. На основі супутникових даних були створені карти, що показують розподіл цих індексів, і визначено, як вони змінюються в просторі. Це дозволило зробити висновки про гідрогеологічну ситуацію. Дослідження показало, що зміни в індексах є чудовим способом відстежувати екологічний стан територій, які постраждали від видобутку корисних копалин, і показують, як промислові об'єкти впливають на природу.

Об'єкт досліджень: гідрогеологічні умови території шламосховища ПрАТ «ЦГЗК» та прилеглих земель

Предмет досліджень: просторово-часові зміни водного індексу NDWI та вегетаційного NDVI як індикаторів трансформації вологості режиму і стану рослинного покриву під впливом діяльності шламосховища.

Мета роботи: здійснити гідрогеологічну інтерпретацію змін водних та вегетаційних індексів у межах ПрАТ «ЦГЗК» для оцінки впливу техногенного об'єкта на водний режим території та стан рослинного покриву.

Задачі роботи:

1. Проаналізувати природні та гідрогеологічні умови району дослідження;
2. Охарактеризувати особливості функціонування шламосховища ПрАТ «ЦГЗК»;
3. Дослідити методичні підходи до розрахунку індексів NDVI та NDWI;

4. Виконати обробку супутникових даних і побудувати тематичні карти;
5. Проаналізувати просторовий розподіл водного та вегетаційного коефіцієнтів;
6. Здійснити гідрогеологічну інтерпретацію отриманих результатів;
7. Оцінити екологічний вплив шламосховища на прилеглі території.

Ключові слова: ШЛАМОСХОВИЩЕ, ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ, NDVI, NDWI, РОСЛИННИЙ ПОКРИВ, ВОДНИЙ РЕЖИМ, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ТЕХНОГЕННИЙ ВПЛИВ, ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ, ПРАТ «ЦГЗК».

ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ	
1.1. Особливості формування гідрогеологічних умов у межах шламосховищ.....	10
1.2. Вплив гірничодобувної діяльності на водний режим територій.....	11
1.3. Дистанційне зондування Землі у гідрогеології.....	12
1.4. Характеристика індексів NDVI та NDWI.....	13
1.5. Методичні підходи до їх інтерпретації NDVI та NDWI.....	14
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ (ПРАТ «ЦГЗК»)	
2.1. Загальна характеристика підприємства та шламосховища.....	15
2.2. Географічне положення та природні умови.....	17
2.3. Геологічна будова території.....	18
2.4. Гідрогеологічні умови району.....	19
2.5. Техногенне навантаження та екологічний стан.....	21
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА ДОСЛІДЖЕННЯ	
3.1. Джерела даних (супутникові знімки, геологічні матеріали).....	22
3.2. Методика розрахунку NDVI.....	23
3.3. Методика розрахунку NDWI.....	24
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЗМІН ВОДНОГО ТА ВЕГЕТАЦІЙНОГО ІНДЕКСІВ	
4.1. Просторовий розподіл NDWI.....	27
4.2. Просторовий розподіл NDVI.....	29
4.3. Часова динаміка індексів.....	31
4.4. Виявлення аномальних зон.....	33
4.5. Кореляційний аналіз NDVI та NDWI.....	35
РОЗДІЛ 5. ГІДРОГЕОЛОГІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	
5.1. Оцінка водного режиму шламосховища.....	36

5.2. Інфільтраційні процеси та живлення підземних вод.....	37
5.3. Зони фільтрації та потенційного забруднення.....	38
5.4. Вплив техногенного фактору на рослинність.....	39
5.5. Прогноз змін гідрогеологічних умов.....	39
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Сучасний розвиток гірничодобувної промисловості є одним із важливих чинників економічного зростання України, проте водночас супроводжується значним антропогенним впливом на навколишнє природне середовище. Особливої уваги потребують техногенні об'єкти гірничорудних підприємств, зокрема хвосто- та шламосховища, які займають значні площі та можуть впливати на стан поверхневих і підземних вод, ґрунтового покриву та рослинності. У межах Криворізького залізорудного басейну одним із найбільших таких об'єктів є шламосховище ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ЦГЗК), яке протягом тривалого часу використовується для складування відходів збагачення залізних руд.

Експлуатація шламосховищ супроводжується накопиченням значних обсягів рідких і твердих відходів, що призводить до зміни природних умов формування поверхневого та підземного стоку. Внаслідок інфільтрації води через товщу шламових відкладів можливе формування локальних зон підтоплення, зміна рівнів підземних вод та поширення забруднювальних речовин у геологічному середовищі. Такі процеси безпосередньо впливають на екологічний стан прилеглих територій і можуть спричиняти трансформацію природних екосистем.

Одним із найбільш чутливих індикаторів змін навколишнього середовища є рослинний покрив, стан якого залежить від вологості ґрунтів, рівня ґрунтових вод та загальних умов зволоження території. Зміни водного режиму, викликані діяльністю шламосховища, відображаються на розвитку рослинності та можуть бути виявлені за допомогою сучасних методів дистанційного зондування Землі. Використання супутникових даних дозволяє здійснювати комплексний моніторинг територій великих техногенних об'єктів, оперативно оцінювати їхній вплив на довкілля та виявляти потенційно небезпечні зміни.

Особливого значення для таких досліджень набувають спектральні індекси, які розраховуються на основі багатозональних супутникових знімків. Найбільш поширеним показником оцінки стану рослинності є нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Цей показник

характеризує інтенсивність фотосинтетичної активності рослинного покриву та дозволяє визначати рівень його розвитку, густоту і життєздатність. Високі значення свідчать про наявність здорової та густої рослинності, тоді як низькі значення характерні для деградованих, техногенно порушених або мало заліснених територій.

Не менш важливим показником є нормалізований водний індекс NDWI (Normalized Difference Water Index), який використовується для оцінки вологості поверхні, виділення водних об'єктів та аналізу умов зволоження території. Застосування дає можливість оцінити особливості розподілу вологи в межах шламосховища та прилеглих земель, а також простежити вплив інфільтраційних процесів на навколишнє середовище.

Комплексне використання індексів NDVI та NDWI відкриває широкі можливості для дослідження взаємозв'язків між станом рослинного покриву та водним режимом території. Аналіз просторового розподілу та часової динаміки цих показників дозволяє виявити ділянки підвищеного або недостатнього зволоження, оцінити ступінь техногенного впливу на природні компоненти ландшафту та здійснити гідрогеологічну інтерпретацію отриманих результатів.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю удосконалення методів моніторингу техногенно навантажених територій та підвищення ефективності оцінки екологічних наслідків діяльності гірничодобувних підприємств. Використання матеріалів дистанційного зондування Землі у поєднанні з гідрогеологічним аналізом дозволяє отримати об'єктивну інформацію про стан навколишнього середовища та своєчасно виявляти негативні зміни, пов'язані з функціонуванням шламосховищ.

Об'єктом дослідження є гідрогеологічні умови території шламосховища ПрАТ «ЦГЗК» та прилеглих земель.

Предметом дослідження є просторово-часові зміни водного індексу NDWI та вегетаційного індексу NDVI як індикаторів трансформації водного режиму та стану рослинного покриву в умовах техногенного впливу шламосховища.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1. Особливості формування гідрогеологічних умов у межах шламосховищ

Гідрогеологічні умови в районах розташування шламосховищ зазнають значної технічної трансформації. Шламосховища виступають як потужні джерела штучного живлення водоносних горизонтів, що призводять до змін гідродинамічного режиму та хімічного складу підземних вод. Основні моменти цієї трансформації включають.

Формування гідродинамічного «купола»: Вода із шламосховищ просочується в землю і тим самим утворює «купол» розтікання. Це призведе до підтоплення прилеглих ділянок та пошкодить сусідні будівлі.

Зміна режиму фільтрації та кольматація: Дрібнодисперсні частинки шламу забивають пори ґрунту в основі сховища, зменшуючи його проникність. Однак під дією сильного тиску великого об'єму води, рідкі відходи все одно проникає в глибокі водоносні горизонти.

Техногенне та хімічне забруднення: Проникаючі води насичуються розчиненими компонентами шламу, включаючи важкі метали, солі (сульфати, хлориди) та інші токсичні мікроелементи. Зміна рН середовища активізує процеси розчинення природних мінералів, посилюючи забруднення.

Порушення вертикальної взаємодії водоносних горизонтів: Шламосховища можуть руйнувати природну гідрогеологічну ізоляцію між водоносними шарами. Тиск «купола» сприяє витісненню чистих підземних вод з верхнього кругозору у нижні, створюючи ризик забруднення глибоких артезіанських водоносних горизонтів, що використовуються для питного водопостачання.

1.2. Вплив гірничодобувної діяльності на водний режим території

Видобуток корисних копалин на території шламосховища ПРАТ «ЦГЗК» має значний вплив на водний баланс навколишніх земель. Це призводить до порушення природного кругообігу води, як на поверхні, так і під землею. Основні наслідки цього впливу включають, зміна природного плину вод такі як будівництво дамб та відвалів змінює ландшафт, відводячи або перекриваючи природні водні потоки. Це може спричинити як надмірне зволоження одних територій, так і їхнє висихання. Ще одним із наслідків є підняття рівня ґрунтових вод, просочування води зі шламосховища поступово насичує ґрунт, підвищуючи рівень. Це може призвести до заболочення, що негативно позначається на рослинності та ґрунтах.

Забруднення вод: шлами містять дрібні частинки руди, хімічні реагенти та солі важких металів. При фільтрації ці речовини можуть потрапляти у водоносні шари, погіршуючи якість. Зміна хімічного складу води: Вода поблизу шламосховища часто стає більш мінералізованою, з підвищеним вмістом сульфатів, хлоридів, заліза та інших шкідливих домішок, що шкодить екосистемам. Надмірне споживання речовини: Гірничо-збагачувальні підприємства потребують великих обсягів води для транспортування шламів та виробничих процесів. Це виснажує місцеві водні ресурси, впливаючи на рівень річок та водойм.

1.3. Дистанційне зондування Землі у гідрогеології

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – це сучасний інструмент для вивчення підземних вод, який використовує дані з супутників, літаків та безпілотників. Ці дані, отримані за допомогою оптичних, теплових та радарних камер, дозволяють детально досліджувати та картографувати підземні води. Завдяки ДЗЗ ми можемо оцінювати запаси вологи, знаходити водоносні горизонти та ефективно запобігати їх виснаженню [1].

Основні сфери застосування у гідрогеології полягають у пошуках і картографування підземних вод, виявлення лінеamentів: Завдяки супутниковим знімкам високої роздільної здатності можна ідентифікувати розломи, тріщини та

зони тектонічних порушень, які у скельних породах слугують основними накопичувачами та каналами руху підземної води. Аналіз рельєфу і геоморфології: Використання цифрових моделей ландшафту (ЦМР) дозволяє визначити потенційні місця виходу ґрунтових вод, такі як джерела та заболочені ділянки. Картування вологості ґрунтів і стану рослинності, індекси: Оптичні дані з супутників (наприклад, Sentinel-2, Landsat) дають можливість розраховувати показників, такі як NDVI та NDWI. Здорове і зелене рослинництво у посушливі періоди часто свідчить про близькість ґрунтових вод до поверхні. Радарна інтерферометрія: Дані SAR дозволяють вимірювати зміни вмісту вологи у верхніх шарах ґрунту, що є важливою інформацією для оцінки балансу підземних вод. Термографія (теплові інфрачервоні знімки) пошук підводних джерел: Вода має більшу теплоємність порівняно з ґрунтом або повітрям, тому теплові знімки застосовують для виявлення виходів прісних підземних вод у водойми, а також температурних аномалій, що можуть сигналізувати про підземні потоки. Моніторинг гідрогеологічних ризиків, осідання земної поверхні (Subsidence): За допомогою радарних даних InSAR здійснюють точний нагляд просадок ґрунту, які виникають через надмірний відбір підземних вод, що є особливо важливим для міських і сільськогосподарських територій. Оцінка посух і запасів вологи: Дані супутників гравіметричних місій (наприклад, GRACE) дозволяють відстежувати динаміку водних мас та зміни в запасах води у великих підземних басейнах на глобальному та регіональному рівнях.

1.4. Характеристика індексів NDVI та NDWI

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)- нормалізований диференційний індекс рослин. Є одним із найчастіше застосовуваних індексів дистанційного зондування для оцінки стану рослинного покриву. Він розраховується на основі різниці інтенсивності відбиття світла у червоній та ближній інфрачервоній частинки спектра.

Формула розрахунку:
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED};$$

де: NIR — відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні; RED — відбиття у червоному спектральному діапазоні.

Основними характеристиками є значення індексу варіюються від -1 до $+1$. Високі значення ($0,6-0,9$) зазвичай свідчать про густу та здорову рослинність. Середні значення ($0,2-0,5$) характерні для поодинокі зелені або сільськогосподарських земель. Низькі або від'ємні значення вказують на наявність водних поверхонь, будівель або відкритих ґрунтів.

Сфери застосування: Визначення стану рослинного покриву; Відстеження процесів деградації земель; Аналіз впливу посух; Контроль заходів рекультивації; Оцінка екологічного стану територій, що зазнали гірничодобувної діяльності.

NDWI (Normalized Difference Water Index)- нормалізований диференційний індекс води. Він використовується для оцінки вмісту вологи та ідентифікації водних об'єктів. Існує декілька варіантів цього індексу, однак найчастіше застосовується формула, що базується на зеленому та ближньому інфрачервоному каналах.

Формула розрахунку: $NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$,

де: GREEN — відбиття у зеленому діапазоні; NIR-відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні.

Ключові властивості: Значення коливаються у діапазоні від -1 до $+1$. Позитивні роль зазвичай асоціюються з водними масивами. Від'ємні або низькі значення характерні для ґрунтів, забудованих територій та рослинності.

NDWI застосовується в виявленні водойм та зон затоплення, моніторинг вологості ґрунтів, оцінювання водного балансу територій, контроль за змінами у шламосховищах та хвостосховищах і аналіз впливу техногенних факторів на гідрологічні умови.

1.5. Методичні підходи до їх інтерпретації індексів NDVI та NDWI

Для розуміння того, що означають показники NDVI та NDWI, ми використовуємо супутникові знімки Землі. Ці дані допомагають нам оцінити стан

природи, побачити, як змінюється рослинність та водний баланс на певних територіях. Особливо корисними ці методи є для моніторингу впливу промисловості, наприкладі хвостосховищ ПРАТ «ЦГЗК», де вони дозволяють відстежувати наслідки людської діяльності. Зазвичай використовують багатоспектральні знімки з різних супутників зокрема (Landsat 8/9, Sentinel-2 іноді MODIS) та інші доступні безкоштовні супутникові системи. При виборі зображень особлива увага приділяється таким умовам знімки зроблені за ясної погоди без хмарного покриття обрані приблизно в один і той самий період року враховується сезонна та міжрічна динаміка змін території. Перед розрахунком індексів виконується комплексна попередня обробка зображень яка включає атмосферну корекцію географічне вирівнювання реєстрацію вирізання потрібної ділянки дослідження усунення шумів хмар та їх тіней. Ці процедури забезпечують високу точність і надійність подальшого аналізу. Після підготовки зображень за спеціальними формулами обчислюються два ключові індекси. Значення NDVI інтерпретуються таким чином: менше 0 водні поверхні штучні покриття будівлі дороги бетон; (від 0 до 02) оголений ґрунт відвали породи малопродуктивні території; (від 02 до 05) розріджена або пригнічена рослинність; (від 05 до 08) густа здорова флора. Для хвостосховищ низькі показники NDVI свідчать про відсутність зелені погіршення стану ґрунтів навантаження від промислової діяльності. Значення NDWI інтерпретуються таким чином; (більше 0 до +1) водні об'єкти ділянки з надмірною вологістю; (менше 0 до -1) сухі поверхні рослинність. Біля шламосховищ високі показники можуть вказувати на витік технічних вод підтоплення території накопичення вологи в ґрунтах.

РОЗДІЛ 2.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ

ДОСЛІДЖЕННЯ (ПРАТ «ЦГЗК»)

2.1. Загальна характеристика підприємства та шламосховища

Приватне акціонерне товариство «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПРАТ «Центральний ГЗК») є одним із провідних підприємств, що спеціалізується на видобутку залізорудної сировини для металургійної промисловості України та країн Східної Європи. Комбінат розташований у місті Кривий Ріг і функціонує з 1961 року. Раніше він був частиною державної акціонерної компанії «Укррудпром». Сировинну базу ПРАТ «Центральний ГЗК» складають залізисті кварцити родовища Велика Глеюватка (кар'єр №1), Петрівське (кар'єр №3), Артемівське (кар'єр №4), а також поклад Південного Магнетитового рудного поля шахти імені Орджонікідзе. Кар'єри, що експлуатуються відкритим способом, видобувають руду з розміром шматків від 400 до 1100 мм.

2.2. Географічне положення та природні умови

Об'єкти ПРАТ «ЦГЗК» розташовані в межах південно-бузьких степів де, домінує переважно рівнинний рельєф [4]. Місцевість характеризується пологими схилами, неглибокими ярами та відсутністю значних ерозійних форм. Виробничий майданчик знаходиться в Криворізькому районі Дніпропетровської області, неподалік від сіл Червона Балка (приблизно 1 км на північ) та Глеюватка (близько 1,5 км на північний схід). Поруч із шламосховищем розташовані населені пункти Лозуватка (на північний захід) та Мар'янівка (на південний захід), як показано на рис 2.1.

Ключовим водним ресурсом регіону є річка Інгулець, яка впадає до Карачунівського водосховища основного джерела питного водопостачання для Кривого Рогу. Висоти вододілів у районі сягають 135–145 метрів, на

проммайданчику вони становлять близько 135 м. , тоді як найнижчі відмітки (59–65 метрів) спостерігаються в заплаві Інгульця. Долина водойми біля Лозуватки розширюється до 1,5 км, а біля Мар'янівки звужується. Вона має дві надзаплавні тераси, а ширина русла може досягати 400 метрів.

Живлення річки Інгулець переважно відбувається за рахунок талих та дощових вод, які складають близько 77% від загального стоку. Додатково, близько 17% сток забезпечують підземні джерела. Весняне водопілля, спричинене таненням снігів та дощами, триває з кінця лютого до початку березня, призводить до підйому рівня води на 1,5-5 метрів.

Багаторічні дані свідчать про значні коливання рівня опадів. Спостерігалися як період сильної засухи (20-50% від норми), так і надмірної вологості (більш ніж на 120% вище норм), з періодами, близькими до середніх. Довгострокові спостереження показують загальну тенденцію до зростання річних опадів, але сучасна ситуація відзначається високою непередбачуваністю та різкими коливаннями вологості.



Рис 2.1- Географічне положення хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» (Джерело: Google Maps).

2.3. Геологічна будова території

Геологічна будова території ПрАТ «ЦГЗК» є доволі складною. Ця місцевість

характеризується поєднанням давніх кристалічних порід докембрійського віку (архей-протерозой), які зазнали значних деформацій через тектонічні процеси, та молодших осадових відкладень, що утворилися в палеогені, неогені та четвертинному періоді.

Основа геологічного розрізу представлена твердими кристалічними породами, такими як гнейси, мігматити, сланці та залізисті кварцити. Місцями ці породи вкриті продуктами вивітрювання – каоліновими кораами. У певних районах, наприклад, у долині річки Саксагань або поблизу Карачунівського водосховища, ці давні породи виходять на поверхню або залягають на невеликій глибині. Однак у зниженнях рельєфу фундамент може опускатися до 37–45 метрів, перекритий шарами суглинків, пісків та глин.

У районах балок Велика та Мала Лозуватки тріщинуваті граніти виявляються вже на глибині (8–10 м.). Під шламосховищем глибина залягання цих гранітів становить 37–40 метрів.

Відклади неогенового та четвертинного періодів складаються переважно з пісків і глин. Піски сарматського ярусу залягають на корах вивітрювання або безпосередньо на гранітах. Їхня максимальна потужність (до 34 метрів) спостерігається на заході, тоді як ближче до водосховища вона зменшується. На сході ці піски замінюються червоно-бурими глинами.

Над піщаними горизонтом розташовані глини та суглинки неоген-четвертинного віку, які виконують функцію гідроізоляції. Ці шари мають неоднорідну структуру, містять гіпс та кам'яну сіль, а їхня потужність варіюється від 4 до 12 метрів. У верхніх частинах ці глини поступово переходять у червоно-бурі суглинки, які мають властивості, подібні до "плавунів".

Завершують геологічний розріз лісоподібні суглинки з пористою структурою. Вони містять залишки ґрунтів та солей (сульфати, хлориди, карбонати). Потужність цих суглинків сягає 12 метрів під шламосховищем.

2.4. Гідрогеологічні умови району

Гідрогеологічні умови в районі розташування об'єктів ПрА ЦГЗК є складними, що зумовлено геолого-структурними особливостями Криворізької структури, специфікою рельєфу, близькістю річкової сітки (р. Саксагань) та потужним багаторічним техногенним впливом гірничого виробництва. Регіон належить до Українського тріщинно-блокового басейну підземних вод, у геологічному розрізі якого виділяють два основні водоносні комплекси.

Перший поверхневий водоносний комплекс, представлений відкладами четвертинного та неогеного віку. Він охоплює горизонти в алювіальних відкладах долин, річок, а також у пісках та вапняках понтичного й меотичного ярусів. Глибина залягання цього комплексу варіюється від перших метрів у долинах річок та поблизу шламосховищ до 15–25 м на вододілах. Цей комплекс зазнає найбільшого впливу від фільтрації води ставків-накопичувачів ПрАТ «ЦГЗК» [4]. У зонах впливу промислових майданчиків спостерігається техногенний підпір підземних вод, що призводить до підтоплення прилеглих територій та підняття рівня ґрунтової води майже до денної поверхні.

Другий, глибинний водоносний комплекс, знаходиться у тріщинній зоні кристалічних порід докембрію. Водовмісними є тріщинуваті граніти, гнейси, а також залізисті кварцити та сланці. Водність цього комплексу нерівномірна і залежить від ступеня тріщинуватості та тектонічної порушеності порід, причому найбільш водорясними є зони тектонічних розломів. Внаслідок глибокого водовідливу з кар'єрів (Глеюватського, Петрівського, Артемівського) та шахт комбінату навколо виробок утворилися потужні депресійні воронки. Гірничі роботи перехоплюють підземний стік, викликаючи осушення кристалічного масиву на значних глибинах і створюючи постійний приплив шахтних і кар'єрних вод, які потребують відкачування та подальшої утилізації.

2.5. Техногенне навантаження та екологічний стан

Впровадження сучасного обладнання на збагачувальній фабриці «ЦГЗК» компанії «Метінвест» суттєво оптимізує виробничі процеси та зменшує їхній негативний вплив на довкілля. Енергоефективність та економія ресурсів: Нове обладнання дозволяє знизити собівартість переробки корисних копалин. Автономні фільтраційні установки з власними насосами забезпечують значну економію електроенергії. Порівняно зі старими тканинними фільтрами, нові системи економлять 640 кіловат-годин щогодини. Можливість подавати густу масу на фільтри КДФ-90 скорочує витрати технічної води. Керамічні елементи фільтрів потребують заміни значно рідше, ніж тканинні.

Покращення якості продукції та продуктивності: Встановлення грукотів Derrick дозволить отримувати продукт більш меншого помелу. Нові вакуум-фільтри впливатимуть на кінцеві характеристики концентрату, зокрема на його вологість. Очікується зменшення з попередніх значень до більш низьких показників. Попередні випробування керамічних фільтрів показали вдвічі вищу продуктивність порівняно з тканинними аналогами. Керамічні фільтруючі елементи розраховані на випуск значно більших обсягів на годину, ніж старе обладнання. Нові фільтри інтегруються в технологічний процес, оптимізований для виробництва концентрату з високою масовою часткою заліза.

Зменшення пилоутворення: Відходи збагачення, що зберігаються, складаються переважно з дрібних частинок. За несприятливих погодних умов це може призводити до значного забруднення повітря. Насичені водою об'єкти можуть створювати ризики фільтрації та потрапляння промислових вод у природні водойми, що негативно впливає на стан підземних . Розширення площ для зберігання відходів збагачення вимагає постійного виділення нових територій.

Підприємство впроваджує заходи для зменшення свого впливу на довкілля. Зокрема для боротьби з пилом висаджують спеціальні рослини, такі як курай іберійський. Завдяки своїй формі, можуть утримувати значну кількість пилу – до тонни на гектар щорічно, створюючи природні бар'єри.

Щодо вод, то впроваджуються нові системи трубопроводів, які дозволяють повторно використовувати високомінералізовані води з шахт у виробничих процесах. Це допомагає зменшити обсяги стічних вод, що потрапляють у річки.

Діяльність підприємства також є частиною ширших міських ініціатив, спрямованих на покращення екологічної ситуації. Це включає модернізацію обладнання та відновлення земель. В рамках програми «Криворізька екологічна програма-2025», Північний ГЗК вже успішно протестував висадку кураю іберійського на шламосховищах. Цей проект покликаний стабілізувати поверхні, що пилять, і зменшити негативний вплив на природу. Курай іберійський був обраний не випадково: він стійкий до посухи та засолених ґрунтів, добре росте на складних поверхнях, таких як скелі та піски. Його куляста форма дозволяє ефективно затримувати пил.

Екологи підприємства, спільно з науковцями, провели двохетапний експеримент. Спочатку підготували основу для рослин, а потім висадили курай на чотирьох гектарах шламосховища, де спостерігалось пиління. Наступним етапом планується закріплення поверхні шламосховищ за допомогою спеціального хімічного реагенту (кемпелану). Цей реагент утворює міцну, але гнучку оболонку, яка на тривалий час запобігатиме утворенню та розповсюдженню пилу.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Джерела даних (супутникові знімки, геологічні матеріали)

Дану роботу виконували завдяки сайту Copernicus Browser, безкоштовний інструмент, Європейського космічного агентства (ESA). Він надає доступ до повнорозмірних супутникових знімків, має зручний інтерфейс і розширені аналітичні можливості. Для наших досліджень ми обрали супутникові дані з Sentinel-2 (рівень обробки L2A) [6].

У копернікусі знаходимо в пошуку наш об'єкт дослідження та виділили відповідну територію інтересу (Area of Interest – AOI). В межах окресленої AOI були отримані растрові карти, що відображають значення вегетаційного індексу NDVI та водного NDWI.

За допомогою вбудованого аналітичного інструменту "Statistical Info" було побудовано довгострокові часові ряди (з охопленням 1-5 років) та зменшена хмарність на (10%) для якісніших знімків, після чого цифрові дані було експортовано у форматі CSV. Спочатку ми підготували дані в Excel: розклали їх по полицках, знайшли середні значення кожного місяця, а потім використовували їх для кореляційного аналізу.

3.2. Методика розрахунку NDVI

Середнє значення індексу NDVI по всій досліджуваній території, позначене темно-синьою лінією, демонструє чіткий хвилеподібний характер. Щорічно спостерігається очікуване зростання показника в теплу пору року (весна-літо), коли активно розвивається очерет та прибережна рослинність. У цей період індекс досягає значень 0,20–0,25. З настанням зими, коли рослинність переходить у стан спокою або відмирає, індекс знижується до показників, близьких до нуля (0,01–0,03).

Світло-блакитна зона, що оточує середню лінію, наочно ілюструє неоднорідність ландшафту в балці Лозуватка. Мінімальні значення: Регулярно опускаються в негативну зону (від $-0,20$ до $-0,40$). Це свідчить про наявність ділянок з відкритою водною поверхнею (став-освітлювач), яка активно поглинає інфрачервоне отримує надлишкове зволоження.

На загальному графіку чітко простежується екстремальний мінімум, зафіксований приблизно 15 листопада 2023 року. Тоді середнє значення індексу вперше стало від'ємним ($-0,02$). Ця аномалія пояснюється промерзанням шламових полів та утворенням стійкого снігового покриву в Криворізькому регіоні, що суттєво змінило спектральні властивості поверхні. На противагу цьому, найвищі та найтриваліші піки в літні місяці (наприклад, 9 серпня 2022 року та 3 липня 2024 року) свідчать про періоди максимального розвитку рослинності. Це, ймовірно, спричинено інтенсивним проникненням вологи та підвищенням рівня техногенних ґрунтових вод.

3.3. Методика розрахунку NDWI

Протягом усього п'ятирічного періоду спостережень основна лінія графіка стабільно перебуває в негативній області, коливаючись в межах від $-0,05$ до $-0,20$. З точки зору інженерно-екологічної оцінки, це математично підтверджує, що площі сухих та напівсухих відходів збагачення, разом із захисними дамбами, значно перевищують площу водного дзеркала освітлювального ставка в межах промислової зони. Це свідчить про нормальне функціонування шламосховища, яке характеризується збалансованим накопиченням сухих відкладень.

Значний вертикальний розкид даних у блакитній зоні графіка візуально підтверджує високу неоднорідність об'єкта в просторовому вимірі. Верхня межа розкиду стабільно перетинає нульову позначку і знаходиться в позитивній зоні, коливаючись від $+0,40$ до $+0,80$. Згідно з встановленими методичними критеріями, такий високий індекс свідчить про постійну присутність у чаші шламосховища

значного об'єму вільної технологічної води освітлювального ставка, яка активно поглинає інфрачервоне випромінювання.

Нижня межа розкиду опускається в глибоку негативну зону, досягаючи позначок від -0,40 до -0,60. Це вказує на наявність ділянок з екстремальним висихання поверхні які піддаються найінтенсивнішому сонячному випромінюванню в липні та серпні кожного року.

На графіку чітко виділяються два значні періоди змін у гідродинаміці: Період з 2021 року до середини 2022 року: Цей період характеризується максимальним вертикальним розкидом індексу (максимальні значення сягають +0,80). Це свідчить про фазу максимального зволоження чаші шламосховища та утримання великого об'єму води. А з 2024 року до початку 2026 року: Спостерігається виражена стабілізація та звуження діапазону коливань даних, де верхні максимальні значення більше не перевищують позначки (+0,20).

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ЗМІН ВОДНОГО ТА ВЕГЕТАЦІЙНОГО ІНДЕКСІВ

4.1. Просторовий розподіл NDWI

Для комплексного дослідження просторових закономірностей обводнення території, фіксування поточних контурів рідкої фази відходів та оцінювання вологості ландшафтів. Результати просторового розподілу нормалізованого різницевого водного індексу NDWI, отримані шляхом обробки спектральних каналів супутника Sentinel-2, представлено на (рис. 4.1).



Рис 4.1- Супутниковий знімок території хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» (NDWI)

Аналіз картографічних даних дозволив чітко розмежувати територію за рівнем зволоження та капілярного насичення вологою. На цифровій моделі чітко видно окремі ділянки з постійною присутністю рідкої води, позначені фіолетово кольором (індекс від +0,30 до +1,0).

Основний ставок-освітлювач розташований у північно-західній частині шламосховища, утворюючи витягнуту форму вздовж схилу балки. Додаткова, менша водойма знаходиться у північно-східному секторі. Наявність цих окремих зон вказує на секційну експлуатацію ПрАТ «ЦГЗК». Центральна та південна частини шламосховища мають блідо-жовті та бежеві відтінки (NDWI нижче -0,15), що свідчить про підсохлі пляжі. Блідо-жовті ділянки – це найбільш сухі, дренажні зони дрібнодисперсних шлаків. Через низьку вологість вони можуть стати джерелом пилу та вітрової ерозії в теплу пору року.

Особливу увагу з точки зору геоекологічної безпеки привертають зовнішні та внутрішні дамби, позначені помаранчевою лінією. Вздовж дамб спостерігається інтенсивне темно-зелене забарвлення (від -0,15 до 0,0), що вказує на високий рівень капілярного зволоження. Це підтверджує процеси бічної фільтрації (втрати води) крізь тіло дамби під тиском води зі ставка-освітлювача.

Аналіз того, наскільки зволоженою є земля поза межами промислової зони, допомагає зрозуміти, як екологічні проблеми від цього об'єкта можуть поширюватися на сусідні території. Карта, що показує рівень зволоженості, виявляє тривожну тенденцію. Біля основи дамби, що йде на південний захід, видно велику ділянку землі з дуже високим рівнем вологи (інтенсивний зелений колір), що свідчить про перезволоження ґрунтів.

Ще більш серйозна ситуація спостерігається в нижньому лівому кутку карти, прямо в житловій зоні Авангарду. Там виділяється окрема ділянка (фіолетова пляма) з високим показником вологості. Це означає, що штучно створений водоносний горизонт виходить на поверхню, утворюючи відкриту водойму. Така ситуація

становить пряму небезпеку для міцності будівель, підвалів та призводить до погіршення стану ґрунтів у селищі.

Навколо східної частини дамби земля помірно зволожена (світло-зелені відтінки). Однак, оскільки селище Веселий Кут розташоване близько до зони, де відбувається відведення води, необхідно постійно стежити за гідрогеологічною ситуацією, щоб запобігти підвищенню рівня ґрунтових вод.

4.2. Просторовий розподіл NDVI

Для визначення реакції рослинного покриву на техногенне навантаження було проведено просторове моделювання нормалізованого диференційного вегетаційного індексу NDVI. Отримана цифрова модель [6] (рис. 4.2) дає змогу оцінити щільність фітомаси, а також виявити зони аномального розвитку рослинності в місцях виклинювання фільтраційних вод.



Рис 4.2- Супутниковий знімок території хвостосховища ПрАТ «ЦФЗК» (NDVI)

Внутрішня чаша шламосховища на карті представлена переважно блідо-жовтими та майже білими відтінками. Відповідно до розробленої градаційної шкали, значення індексу NDVI тут перебувають у межах від 0 до 0,15 або навіть набувають від'ємних значень на ділянках відкритих ставків-освітлювачів. Це свідчить про практично повну відсутність хлорофіловмісної біомаси. Такі території представлені оголеними сухими пляжами наміву шламів та опорними призмами дамб, де висока мінералізація субстрату й постійний рух пульпи унеможливають закріплення та розвиток вищої рослинності.

Найбільший інтерес для екологічного аналізу становлять ділянки, позначені насиченим темно-зеленим кольором, де значення NDVI коливаються в межах 0,45–0,75. У природних умовах Кривбасу в літній період степова рослинність

зазвичай перебуває у стані депресії та часткового вигорання, що характеризується низькими значеннями. Проте на карті спостерігається значний масив інтенсивної рослинності в південній та південно-західній частинах внутрішнього контуру шламосховища.

Виявлена аномалія безпосередньо корелює з результатами аналізу індексу NDWI. Постійне капілярне підживлення та інфільтрація технологічних вод створили тут умови стійкого техногенного перезволоження. Унаслідок цього сформувалися щільні зарості вологолюбної гідрофітної рослинності, представлені переважно очеретом. Високі значення NDVI свідчать про успішну адаптацію очерету до мінералізованих вод комбінату. Рослинність активно розвивається в зонах підтоплення та виконує функції природного біофільтра.

Навколо південно-західної межі шламосховища простежується суцільний пояс інтенсивної рослинності, який поступово переходить у межі житлової забудови селища. Це підтверджує, що купол підземних фільтраційних вод ЦГЗК поширюється за межі дамбового контуру, спричиняючи перезволоження ґрунтів та стимулюючи активний розвиток бур'янової й вологолюбної рослинності на території населеного пункту.

Район селища Веселий Кут та північні агроландшафти. Сільськогосподарські угіддя, розташовані вздовж східного та північного периметрів шламосховища, характеризуються мозаїчною структурою рослинного покриву — від світло-зелених до жовтуватих відтінків. Такий розподіл відповідає природному стану агроландшафтів і пасовищ, розвиток яких визначається переважно кліматичними чинниками та не зазнає суттєвого гідрогеологічного впливу з боку шламосховища.

4.3. Часова динаміка індексів

На графіках супутникового моніторингу (рис. 4.3 та рис. 4.4) відображено середні значення та діапазони коливань індексів рослинності та водності на території дослідження [6].

Sentinel-2 L2A - NDVI



Рис 4.3- Графік супутникового моніторингу хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» (Sentinel-2 L2A-NDVI)

Sentinel-2 L2A - NDWI

 0%


Рис 4.4- Графік супутникового моніторингу хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» (Sentinel-2 L2A-NDWI)

Графік індексу рослинності NDVI демонструє типові сезонні зміни рослинного покриття, які тісно пов'язані з водним режимом території: Літній період (червень-серпень) максимальні значення щорічно досягають високих показників (+0,75). Тим самим говорить нам про пік розвитку очерету у зволжених ділянках балки.

Водночас, на графіку індексу водності NDWI спостерігається значне зниження показників (-0,45...-0,65), що вказує на інтенсивне висихання відкритих ділянок шламових відвалів під впливом високих літніх температур. Зимовий період (листопад-лютий): На графіку NDVI середні значення індексу знижуються майже до нуля, що відповідає природному стану спокою рослинності.

Натомість, на NDWI у цей же період (наприклад, кінець 2023 – початок 2024 року) спостерігаються різкі підйоми до позначки 0,2. Це свідчить про замерзання

технологічних вод, утворення льодової кірки та випадання снігу, що суттєво змінює відбиваючу здатність поверхні шламових відвалів. Тенденції за індексом NDWI протягом усього досліджуваного періоду середнє значення індексу водності стабільно перебуває в негативній зоні (від -0,15 до -0,25).

Означає, що сухі та напівсухі ділянки відходів збагачення займають значно більшу площу, ніж відкриті водойми. З 2024 року діапазон коливань максимальних значень зростає, і показники стабілізуються нижче -0,10. Це свідчить про відсутність неконтрольованого збільшення рівня води в чаші балки. Тенденції за індексом NDVI: Паралельно зі стабілізацією рівня вологості, характер кривої у період 2024–2026 років також змінюється. Літні піки розвитку рослинності стають менш вираженими, а середні значення плавно стабілізуються в діапазоні +0,1;+0,22. Обмеження надлишкового зволоження призвело до стабілізації площ, зайнятих вологолюбною рослинністю в чаші балки.

4.4. Виявлення аномальних зон

Результати просторового моделювання та оконтурення виявлених зон екологічного ризику, створені на основі топографічних даних, продемонстровані на [6] (рис 4.5).

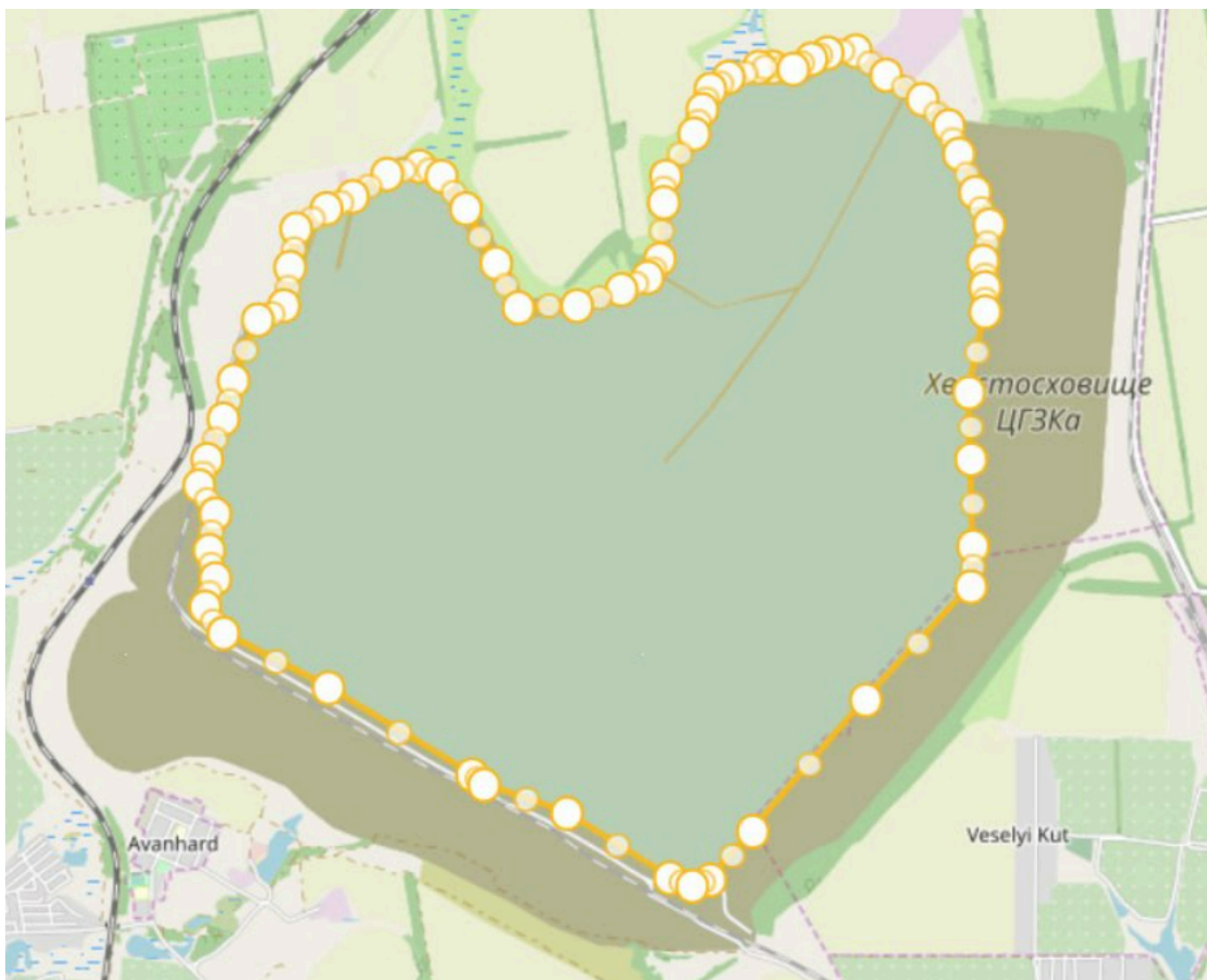


Рис 4.5 - Розташування хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» на космічному знімку місцевості

Західні та південно-західні схили підніжжя огорожувальної дамби. Захисна зона екологічного впливу тут безпосередньо перетинає територію житлової забудови та прилеглих до будинків. Ця аномалія свідчить про критичний напрямок бокового дренажу технічних води крізь тіло та фундамент гідротехнічної споруди. Постійний тиск підземних вод з боку ставка спричиняє штучне підняття рівня за межами виробничої зони.

Південно-східне крило дамби. Тут буферний контур техногенного навантаження дуже близько прилягає до околиць житлового масиву селища. Хоча інтенсивність поверхневого зволоження тут менша, ніж в західному секторі, наближеність

житлових будинків до підніжжя накопичувача визначає цю територію як зону підвищеного екологічного ризику. Будь-яке різке підняття рівня води у водоймі може викликати відповідне зростання рівня верховодки в даному секторі.

4.5. Кореляційний аналіз NDVI та NDWI

Щоб визначити, наскільки тісно пов'язані процеси штучного зволоження території та зміни рослинного покриву, а також оцінити важливість та екологічний вплив цього зв'язку, ми провели повний статистичний кореляційний аналіз. Для аналізу використовувалися перевірені помісячні дані супутникових індексів NDVI та NDWI за 2025 рік, отримані з супутника Sentinel-2 [7] (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Статистичний кореляційний аналіз (за даними 2025 р.).

Дата знімків	Середнє значення NDVI	Середнє значення NDWI
Січень	0,11	-0,22
Лютий	0,05	-0,11
Березень	0,08	-0,17
Квітень	0,13	-0,18
Травень	0,2	-0,23
Червень	0,21	-0,24
Липень	0,18	-0,221
Серпень	0,2	-0,22
Вересень	0,18	-0,25
Жовтень	0,18	-0,24
Листопад	0,13	-0,22
Грудень	0,09	-0,15
Коефіцієнт кореляції	$r = -0,86411$	

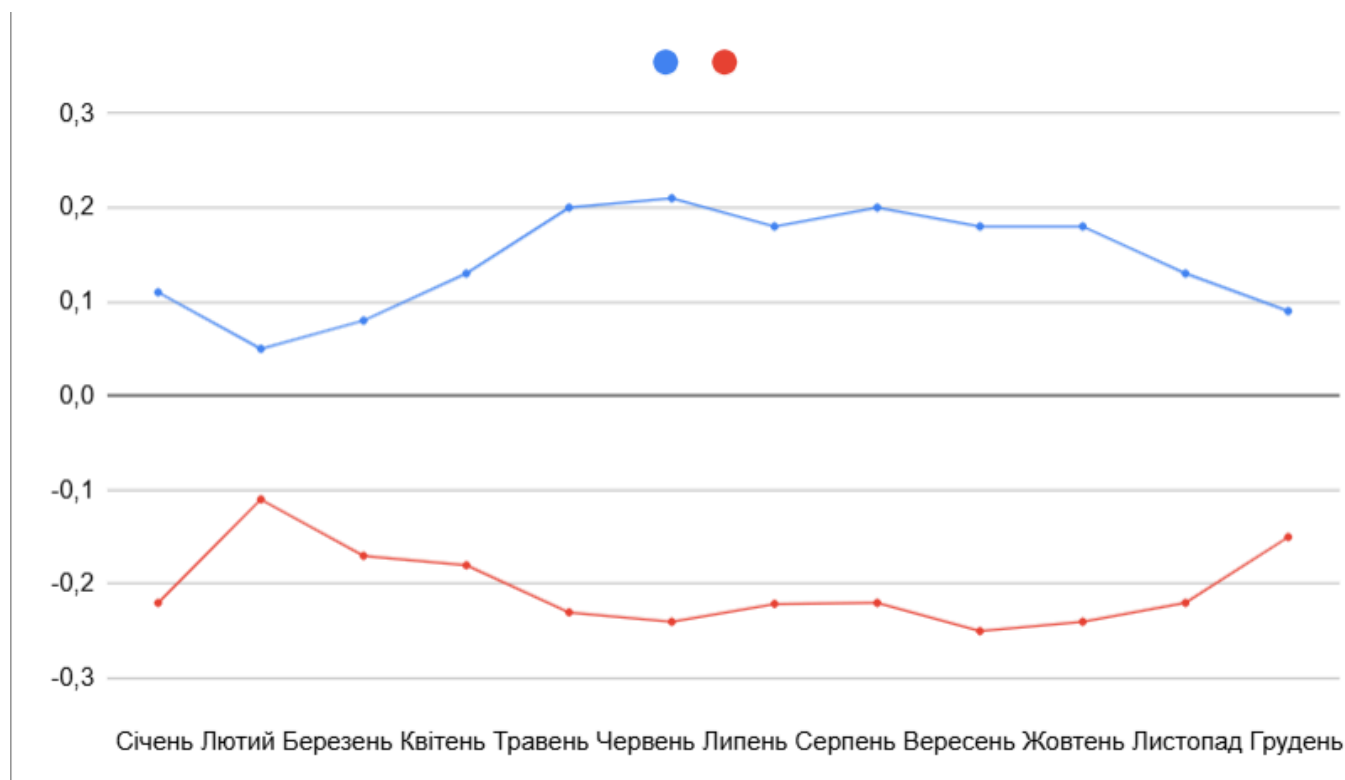


Рис 4.6. Сезонна динаміка середніх значень індексів NDVI та NDWI за даними 2025 року.

Протягом повного 12-місячного циклу було виявлено надзвичайно сильний зворотний зв'язок між вологістю підстилаючої поверхні та станом рослинного покриву на техногенному об'єкті. Коефіцієнт кореляції Пірсона, що становить $r = -0,86411$, за шкалою Чеддока свідчить про екстремально високу силу цього зв'язку [7]. Це означає, що зі збільшенням одного показника інший значно зменшується, і навпаки.

Графічна інтерпретація отриманих кривих дозволяє зрозуміти глибоку екологічну та фізико-географічну логіку взаємодії елементів геотехнічної системи.

Візуальний аналіз наочно демонструє дзеркальний характер ходу кривих. Протягом весняно-літнього періоду (травень–серпень) індекс NDVI, що відображає стан рослинності, досягає свого річного плато, утримуючись на максимальних позначках 0,18-0,21. Це свідчить про фазу активного фізіологічного розвитку та накопичення хлорофілу гідрофітною рослинністю. Водночас індекс NDWI, що відображає вологість усієї споруди, у цей же період дзеркально просідає, досягаючи найнижчих негативних значень (від -0,22 до -0,24). Таке падіння зумовлене тим, що

під дією літніх температур вільна волога з відкритих поверхонь наливних пляжів інтенсивно випаровується. Специфіка об'єкта полягає в тому, що ріст біомаси очерету відбувається на тлі глобального підсихання більшої за площею частини шламосховища, що математично утворює сильний від'ємний коефіцієнт кореляції.

Графік також чітко фіксує інерційність реакції рослинності на гідродинамічні зміни. У лютому індекс NDWI піднімається до відмітки -0,11 (мінімальне зимове випаровування та накопичення снігового покриву). Проте рослинність реагує на цей криогенний спокій із затримкою: мінімум індексу NDVI (0,05) фіксується саме у лютому. У червні спостерігається літній мінімум водності поверхні субстрату шламових відкладень ($NDWI = -0,24$) через початок спеки. Проте за рахунок накопиченого весняного інфільтраційного підживлення та капілярної вологи очеретяні плавні саме у червні досягають свого вегетаційного максимуму ($NDVI = 0,21$). У вересні спостерігається абсолютний річний мінімум індексу NDWI (-0,25), викликаний тривалою літньою посухою та виснаженням ставка зворотним водопостачанням комбінату. Рослинність реагує на цей дефіцит вологи поступовим згасанням, що викликає синхронне падіння NDVI у наступних періодах (спад до 0,13 у листопаді та 0,09 у грудні).

Станом на листопад–грудень спостерігається зворотний злам тенденції, що можна назвати клімато-техногенною інверсією у зимовий період. Лінія NDVI стрімко падає вниз через природне відмирання та анабіоз надземної фітомаси, тоді як лінія NDWI демонструє стрімке підняття вгору (до -0,15). Цей ефект зумовлений замерзанням технологічних водойм та появою снігового покриву, що кардинально трансформує спектральні властивості растра під впливом загального кліматичного фону року.

Дослідження показали, що екосистема хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» працює за чіткими правилами, зумовленими сезонними змінами води та температури, а не хаотично. Ця стабільність протягом року робить комбінований ГІС-моніторинг ефективним інструментом для передбачення майбутнього стану споруди та швидкого виявлення екологічних загроз за її межами [2].

РОЗДІЛ 5

ГІДРОГЕОЛОГІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

5.1. Оцінка водного режиму шламосховища

Стан води у шламосховищі є вирішальним фактором, який визначає, наскільки надійною є захисна дамба та наскільки безпечним є довкілля навколо. Проаналізувавши дані супутникових знімків Sentinel-2 за минулі роки та детально вивчили показник NDWI (індекс вмісту води) за різні періоди. Це дозволило нам комплексно оцінити поточний стан шламосховища та зрозуміти, як змінюється його водний баланс.

Довгострокові дані показують, що протягом останніх років рівень води в системі переважно низький. Середнє значення показника NDWI знаходиться в межах від -0,15 до -0,25. Це означає, що сухі та напівсухі ділянки, де накопичуються відходи збагачення, займають значно більшу площу, ніж відкрита водна поверхня.

Взимку показник зростає, досягаючи найвищих річних значень (від -0,11 до -0,15 у лютому та грудні). Це не пов'язано зі збільшенням скидання стічних вод. Низькі температури призводять до зменшення або повної відсутності випаровування води. А починаючи з липня, рівень поступово знижується, досягаючи найнижчих показників у вересні (до -0,25).

5.2. Інфільтраційні процеси та живлення підземних вод

Робота гідротехнічної споруди в балці створює постійний, відносно стабільний тиск на навколишнє ґрунтове середовище. Оскільки дно балки та дамби самі по собі пропускають воду, утворення штучного водоносного горизонту прискорює процеси просочування води [5]. Це стає головним джерелом штучного поповнення підземних вод на прилеглих територіях.

У західному та південно-західному напрямках спостерігається найменша потужність водоносного горизонту, під яким залягають водопроникні алювіальні відклади. Внаслідок штучного поповнення підземних вод, їх рівень у цих секторах досягає критично низьких значень (менше 1,0–1,5 метра від поверхні). Супутникові знімки чітко ідентифікують цю територію як "Аномальну зону", де існує пряма загроза підтоплення житлових будинків та ділянок селища.

Південно-Східному секторі також позначений як "Аномальна зона". Хоча природні перешкоди сповільнюють рух підземних вод у цьому напрямку, близькість житлових районів до дамби обвалування робить ці території постійно вразливими до гідрогеологічних ризиків.

У період з липня по вересень 2025 року рівень води в ставку знижується до найнижчого показника за рік (-0,25). Це пов'язано з інтенсивним випаровуванням та поверненням очищеної води в оборотний цикл фабрики ПрАТ «ЦГЗК». Однак, через повільну реакцію підземної гідросфери, водоносні горизонти продовжують поповнюватися. Це відбувається за рахунок капілярного витоку води з насиченою водою дамб.

5.3. Зони фільтрації та потенційного забруднення

Для кращого розуміння стану довкілля навколо балки та ефективнішої організації спостережень було проведено дослідження, яке базувалося на аналізі супутникових даних та інформації про рельєф місцевості. Результатом цього стало розподілення прилеглих територій на окремі зони за ступенем екологічної небезпеки. Головна мета цього розподілу – оптимізувати систему моніторингу, яку використовує ПрАТ «ЦГЗК», тобто зробити її більш цілеспрямованою та ефективною [5].

Перша зона охоплює віддалені території, що знаходяться далеко від промислових об'єктів. Сюди відносяться сільськогосподарські угіддя, пасовища та ділянки вододілів. На цих територіях не спостерігається прямого негативного впливу від промислових споруд. Показники рослинності тут відповідають природним

сезонним змінам степової рослинності Криворіжжя і не змінюються через коливання рівня води у шламосховищі. Ці зони слугують фоном для екологічних служб, використовуючи порівняння з ділянками, які зазнали забруднення.

Друга зона включає західний та південно-західний фланги, що безпосередньо прилягають до нижньої частини головної дамби, а також охоплює всю східну та центральну частину селищ. На карті ця зона позначена темно-оливковим кольором. Геологічні особливості цієї зони характеризуються найкращим проникненням води та найменшою товщиною шару ґрунту, який може поглинати вологу. Тут існує прямий зв'язок між рівнем води у шламосховищі та ґрунтових вод у житлових районах, що означає можливість просочування вод до селищ. У підземних водах цієї зони концентрація шкідливих речовин (сульфатів, хлоридів, заліза) перевищує допустимі норми в 2-4 рази через постійне просочування води з шламосховища.

5.4. Вплив техногенного фактору на рослинність

Результати кореляційного та просторового аналізу свідчать про повну залежність фітоценотичних характеристик (стану, щільності, просторової структури) у зоні впливу ПрАТ «ЦГЗК» від техногенного гідродинамічного режиму підприємства. Трансформація рослинного покриву під дією промислових споруд має двонаправлений характер.

Високий рівень гідратації спричинив формування щільних монодомінантних угруповань гідрофільної рослинності. Ця тенденція підтверджується стабільно високими літніми показниками, які зберігаються навіть у періоди посухи завдяки безперервному підземному живленню з резервуару шламосховища. Рослинність у цьому секторі функціонує як природний біофільтр, проте її експансія на прилеглі території вказує на критичну фазу гідроморфної деградації ландшафту.

На противагу цьому, безпосередньо на наливних пляжах та в зонах періодичного скидання високомінералізованих суспензій спостерігається деструктивний вплив техногенного фактора. Через екстремальне сольове та

важкометалеve навантаження, а також регулярне механічне перекриття новим шламом, природна рослинність на пляжах повністю відсутня. Відновлення природних фітоценозів блокується токсичність ґрунту та капілярним засоленням, що виникає під час літнього випаровування. Протягом більшої частини року індекс NDVI тут майже нульовий, що свідчить про повне пригнічення біологічної активності та формування техногенної пустелі, схильної до пилоутворення.

5.5. Прогноз змін гідрогеологічних умов

На основі аналізу змін індексу NDWI (що відображає водність території) у просторі та часі, а також визначення ділянок, схильних до просочування води, було проведено прогнозування змін гідрогеологічної ситуації на середньострокову перспективу. Це прогнозування розглядало два можливі сценарії розвитку подій.

Негативний прогноз полягає в тому, що фільтраційний потік крізь південно-західну дамбу продовжить стабільно підживлювати ґрунтові води, що призведе до розширення меж аномальної зони. Площа земель із критичною глибиною залягання дзеркала підземних вод. Постійне водонасичення глинистих ґрунтів основи призведе до зниження їхніх міцнісних властивостей, що спровокує деформацію фундаментів житлових споруд селища та підвищить ризики зсувних явищ.

Та позитивний прогноз, спорудження лінійної серії вертикальних дренажних свердловин уздовж підосви південно-західної дамби забезпечить штучне перехоплення інфільтраційного потоку. Прогнозний спад дзеркала ґрунтових вод протягом перших двох років експлуатації, що повністю виведе житлову забудову з режиму критичного підтоплення [3].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано гідрогеологічну інтерпретацію змін водного та вегетаційного індексів у межах шламосховища ПрАТ «ЦГЗК» із використанням матеріалів дистанційного зондування Землі та геоінформаційних методів аналізу. Отримані результати дозволили оцінити особливості водного режиму території, визначити закономірності просторового розподілу рослинного покриву та встановити вплив техногенного об'єкта на навколишнє середовище.

1. Проведений аналіз наукових джерел показав, що шламосховища є потужними техногенними об'єктами, які суттєво впливають на гідрогеологічні умови території. Їх функціонування супроводжується зміною природного водного балансу, розвитком процесів інфільтрації, підтоплення або осушення окремих ділянок, а також трансформацією рослинного покриву в межах зон впливу.

2. Встановлено, що територія шламосховища ПрАТ «ЦГЗК» характеризується складними природними та техногенними умовами формування підземного і поверхневого стоку. Наявність значних обсягів накопичених відходів збагачення залізних руд та постійне використання води у виробничому процесі створюють умови для активного розвитку фільтраційних процесів і локальних змін гідрогеологічного режиму.

3. У роботі обґрунтовано доцільність використання індексів NDVI та NDWI як ефективних індикаторів стану рослинності та зволоження території. Застосування супутникових даних дозволяє здійснити оперативний моніторинг території шламосховища та оцінити зміни екологічного стану без проведення масштабних польових досліджень.

4. Аналіз часової динаміки NDVI протягом 2025 року показав чітко виражену сезонну зміну стану рослинного покриву. Мінімальні значення індексу спостерігалися у зимовий період (0,05–0,11), що відповідає фазі спокою рослинності. У весняно-літній етап значення NDVI поступово збільшувалися та досягали максимуму 0,20–0,21, що свідчить про активний розвиток рослинного

покриву. Отримані важливісь загалом характеризують досліджувану територію як ділянку з невисокою густотою рослинності, що обумовлено значною площею техногенно порушених земель.

5. Дослідження водного індексу NDWI показало переважання від'ємних значень протягом року (від $-0,11$ до $-0,25$), що свідчить про відносно низький рівень зволоження більшої частини території та обмежене поширення відкритих водних поверхонь за межами технологічних водойм шламосховища. Найнижчі значення NDWI зафіксовані наприкінці літнього та на початку осіннього періоду, що пов'язано з високими температурами повітря та інтенсивним випаровуванням.

6. Просторовий аналіз індексів дозволив виділити ділянки підвищеного і зниженого зволоження. Найвищі значення NDWI приурочені до технологічних водойм та окремих зон акумуляції вологи, тоді як мінімальні значення характерні для сухих поверхонь дамб, відвалів та ділянок із розвинутими техногенними відкладами.

7. Виявлено взаємозв'язок між показниками NDVI та NDWI. Підвищення рівня зволоження території сприяє покращенню умов розвитку рослинності, що відображається у збільшенні значень NDVI. Разом з тим характер цього зв'язку є нерівномірним через значний вплив техногенних факторів, особливостей землекористування та сезонних кліматичних змін.

8. За результатами гідрогеологічної інтерпретації встановлено, що функціонування шламосховища створює локальні зони перерозподілу водних потоків та впливає на процеси живлення підземних вод. Найбільш ймовірними напрямками розвитку фільтраційних процесів є периферійні ділянки шламосховища, де можливе формування зон техногенного впливу на водоносні горизонти.

9. Визначено потенційно вразливі території, де поєднання підвищеної вологості та техногенного навантаження може сприяти міграції забруднювальних речовин у геологічне середовище. Такі ділянки потребують постійного екологічного та гідрогеологічного моніторингу.

10. Отримані результати підтвердили ефективність використання методів дистанційного зондування Землі для оцінки впливу шламосховищ на навколишнє

середовище. Поєднання індексів NDVI та NDWI забезпечує можливість комплексного аналізу стану рослинного покриву, водного режиму та особливостей функціонування техногенних об'єктів.

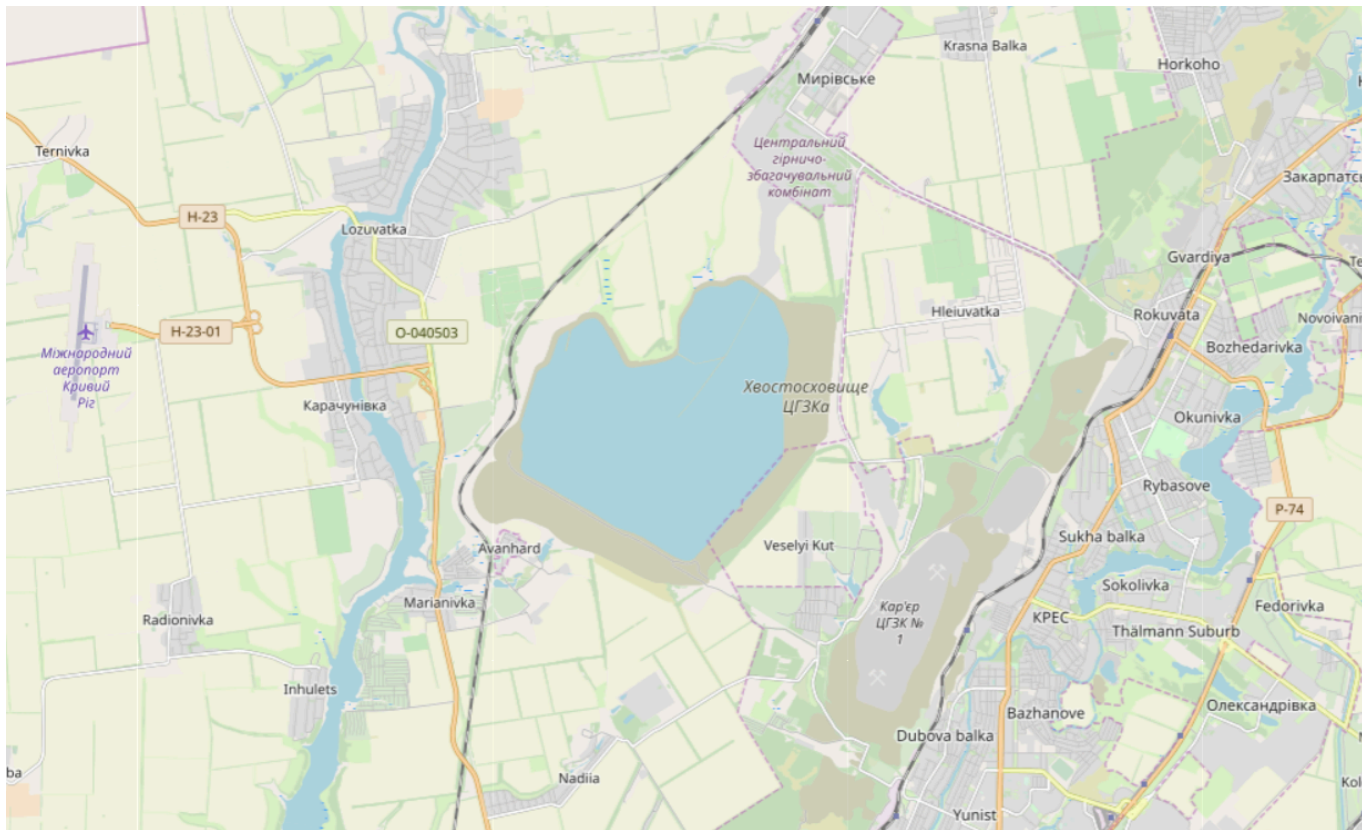
Таким чином, поставлену мету роботи досягнуто, а виконані дослідження дозволили встановити основні закономірності змін водного режиму та рослинного покриву в межах шламосховища ПрАТ «ЦГЗК», оцінити вплив техногенних факторів на гідрогеологічні умови території та визначити перспективні напрями подальшого моніторингу й прогнозування екологічного стану досліджуваного району.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи дистанційного зондування Землі : історія та практичне застосування : навч. посіб. / С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, Л. Я. Юрків. Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. 316 с.
2. Євграфова В. В., Швагер Н. Ю. Екологічний моніторинг хвостосховищ Кривбасу із застосуванням геоінформаційних технологій. *Вісник Криворізького національного університету*. 2023. Вип. 56. С. 112–118.
3. Коротенко М. М. Гідрогеологія та геоекологія техногенно навантажених територій Кривбасу. Дніпро : Журфонд, 2019. 240 с.
4. Офіційний веб портал ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат». Екологічний звіт та заходи з охорони довкілля. URL:
<https://cgzk.metinvestholding.com/>
5. Шевченко О. В., Блінова М. С. Оцінка впливу фільтраційних вод хвостосховищ залізрудних комбінатів на якість підземних вод Кривбасу // Екологічна безпека та природокористування. — 2022. — Вип. 42. — С. 85–94.
6. <https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=13&lat=48.03024&lng=33.39363&themeId=DEFAULTTHEME&visualizationUrl=U2FsdGVkX19LADKoJAxtlOLiTpOvM2M42%2FmoBchebyQlfjNiaaUJT9>
7. <https://docs.google.com/spreadsheets/u/0/>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

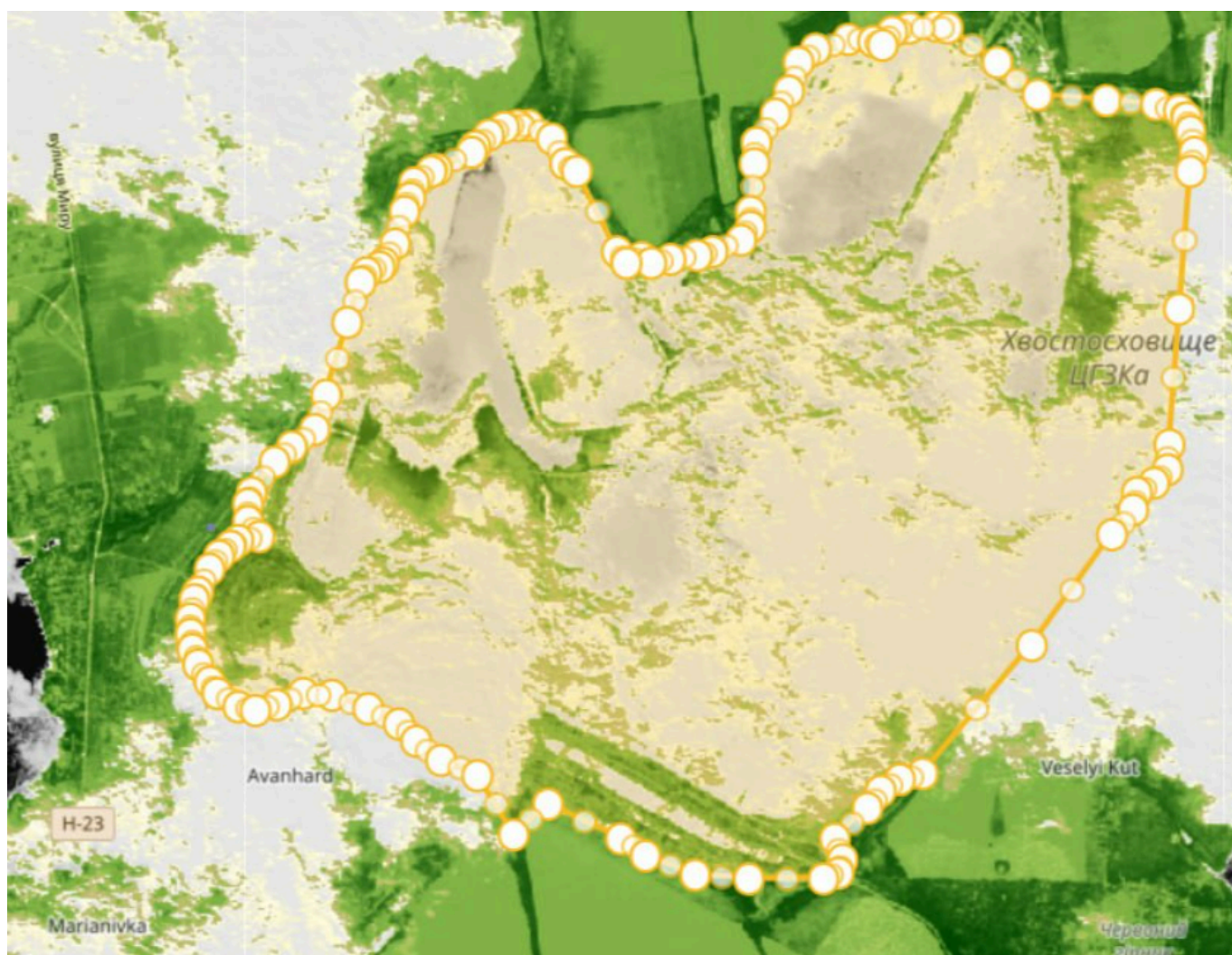


Розташування хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» на космічному знімку місцевості



Географічне положення хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» (Джерело: Google Maps).

ДОДАТОК В



Супутниковий знімок території хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» (NDVI)

ДОДАТОК Г



Супутниковий знімок території хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» (NDWI)

ДОДАТОК Г

Sentinel-2 L2A - NDVI

 0%

Графік супутникового моніторингу хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» (Sentinel-2 L2A-NDVI)

ДОДАТОК Д

Sentinel-2 L2A - NDWI

0%



Графік супутникового моніторингу хвостосховища ПрАТ «ЦГЗК» (Sentinel-2 L2A-NDWI)