



УДК 502.5+049.3:556.31
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.33>

ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ВПЛИВУ КАР'ЄРНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ МЕЖИРІЧНОГО РОДОВИЩА ТИТАНОВИХ РОЗСИПІВ НА ПІДЗЕМНІ ВОДИ

Я. В. Горишнякова¹

В умовах інтенсивного кар'єрного видобутку розсипних титанових руд Межирічного родовища зростає ризик забруднення підземних вод, що загалом впливає на стан водних ресурсів регіону. Відсутність систематичної оцінки інтенсивності цього впливу ускладнює розроблення ефективних заходів захисту підземних вод. Розроблення методології аналізу рівня забруднення водного середовища й оцінювання ефективності природоохоронних заходів є актуальним науковим і практичним завданням. Дослідження спрямоване на розроблення та реалізацію методології оцінювання інтенсивності гідрохімічного впливу кар'єрного видобутку на підземні води в межах Межирічного родовища розсипних титанових руд. Основна увага приділяється оцінюванню поточного стану підземних вод і динаміки змін їхнього хімічного складу на основі даних післяпроектного моніторингу. На основі аналізу даних післяпроектного моніторингу за 2020–2022 роки встановлено, що в зонах впливу кар'єрів і збагачувальних фабрик відбувається поступове зростання в часі концентрацій типових для району та для видобувної діяльності забруднювальних речовин. Виявлено тенденцію до зростання середньоарифметичних значень відносних концентрацій забруднювальних речовин у підземних водах, що вказує на посилення впливу на підземні води техногенних або природних чинників. Аналіз сезонних змін підтвердив, що рівень забруднення підземних вод може змінюватися як залежно від зміни гідрогеологічних умов та інтенсивності виробничої діяльності, так і зі зміною кліматичних чинників.

Уперше в межах Межирічного родовища за розробленою методологією виконано оцінювання інтенсивності впливу гірничодобувної діяльності на підземні води. Уперше виконано комплексний аналіз змін хімічного складу підземних вод із використанням даних післяпроектного моніторингу для оцінювання ефективності природоохоронних заходів. Отримані результати є важливими для екологічної служби підприємства, оскільки дозволяють своєчасно виявляти загрози для підземних вод і розробляти заходи щодо їх мінімізації. Розроблена методологія оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод дозволяє здійснювати комплексний аналіз екологічного стану підземних вод в умовах кар'єрного видобутку титанових руд. Запропонований підхід може стати основою для підтвердження ефективності або, у разі необхідності, для вдосконалення вже реалізованих водоохоронних заходів у межах діяльності гірничодобувних підприємств.

Ключові слова: інтенсивність забруднення, підземні води, гідрохімічний режим, родовище титанових руд, екологічна оцінка.

¹ аспірантка

(Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків)

e-mail: yanagorish@ukr.net

ORCID: 0000-0001-7468-8301

ASSESSMENT OF THE INTENSITY OF THE IMPACT OF OPEN-PIT MINING OF THE MEZHRYCHNE TITANIUM PLACER DEPOSIT ON GROUNDWATER

Y. V. Horyshnyakova

The intensive open-pit mining of alluvial titanium ores at the Mezhyrichne deposit increases the risk of groundwater pollution, which generally affects the state of the region's water resources. The lack of a systematic assessment of the intensity of this impact makes it difficult to develop effective groundwater protection measures. The development of a methodology for analyzing the level of water pollution and assessing the effectiveness of environmental protection measures is an urgent scientific and practical task. The study is aimed at developing and implementing a methodology for assessing the intensity of hydrochemical impact of open-pit mining on groundwater within the Mezhyrichne placer titanium ore deposit. The focus is on assessing the current state of groundwater and the dynamics of changes in its chemical composition based on post-project monitoring data. Based on the analysis of post-project monitoring data for 2020–2022, it was found that in the areas of influence of quarries and concentrators, there is a gradual increase in the concentrations of pollutants typical for the area and for mining activities. A tendency to increase the arithmetic mean values of relative concentrations of pollutants in groundwater was revealed, which indicates an increased impact on groundwater from either anthropogenic or natural factors. The analysis of seasonal changes confirmed that the level of groundwater pollution can vary depending on changes in hydrogeological conditions and intensity of production activities, as well as changes in climatic factors.

For the first time, the intensity of the impact of mining activities on groundwater was assessed within the Mezhyrichne deposit using the developed methodology. For the first time, a comprehensive analysis of changes in the chemical composition of groundwater was performed using post-project monitoring data to assess the effectiveness of environmental protection measures. The results obtained are important for the environmental service of the enterprise, as they allow timely detection of threats to groundwater and development of measures to minimize them. The developed methodology for assessing the intensity of groundwater pollution allows for a comprehensive analysis of the ecological state of groundwater in the conditions of open-pit mining of titanium ores. The proposed approach can serve as a basis for confirming the effectiveness or, if necessary, improving the already implemented water protection measures within the activities of mining enterprises.

Key words: intensity of pollution, groundwater, hydrochemical regime, titanium ore deposit, environmental assessment.

Вступ

В умовах кар'єрного відпрацювання Межирічного родовища розсіпних титанових руд потенційно можливий вплив на рівневий і гідрохімічний режим підземних вод, зокрема першого від поверхні четвертинного водоносного горизонту ґрунтових вод. На промисловому майданчику території Товариства з обмеженою відповідальністю (далі – ТОВ) «Межиріченський гірничозбагачувальний комбінат» (далі – «Межиріченський ГЗК» (МГЗК)), у зв'язку з виробничою спрямованістю, розташовано низку об'єктів, які є потенційними джерелами забруднення підземних вод. Найбільш інтенсивні процеси забруднення в районі кар'єрів «Ісаківський», «Південний» і об'єктів збагачувальних фабрик (далі – ЗФ) «Ісаківська» та «Південна», де в результаті технологічних втрат можлива інфільтрація зворотних вод у горизонт ґрунтових вод. Забруднення підземних вод може відбуватися по всій території промислового майданчика, що дозволяє розглядати його як

площинне джерело забруднення підземних вод загалом. Така ситуація потребує проведення післяпроектного моніторингу.

Загальною метою еколого-гідрогеологічних досліджень у складі післяпроектного моніторингу є оцінювання екологічної надійності практичного впровадження передбачених проектом заходів з охорони підземних вод. Значна роль у цьому належить визначенню інтенсивності їх забруднення в разі його появи у процесі реалізації прийнятої технології відпрацювання родовища. Інтенсивність забруднення підземних вод характеризується концентрацією забруднювальних речовин у підземних водах і залежить від характеру та тривалості видобувної діяльності загалом, впливу окремих джерел забруднення, гідрогеологічних умов території розташування кар'єрів, а також від виду й надійності реалізованих водоохоронних заходів. Водночас постає проблема, пов'язана з необхідністю визначення ефективності водоохоронних рішень, передбачених у проекті, їхньої достатності

та практичної надійності для забезпечення екологічних умов, прийнятних для збереження водних ресурсів.

Насамперед у завдання післяпроектного моніторингу входить виявлення початкового етапу забруднення, оскільки воно може свідчити про ненадійність запроектованих водоохоронних заходів і необхідність запобігання подальшому забрудненню підземних вод, тобто запобігання його розвитку, якщо воно вже почалося. Окрім того, зменшити інтенсивність забруднення на початковій стадії значно простіше і, за необхідності, реалізація додаткових водоохоронних заходів найбільш ефективна в цих умовах. В умовах інтенсифікації видобувної діяльності в регіоні на фоні підвищеної вразливості водних ресурсів набувають досить актуального значення дослідження, спрямовані на обмеження розвитку осередків забруднення у водоносних горизонтах. Це можливо лише за умов наявності об'єктивної оцінки щодо інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на забруднення підземних вод – основи для ухвалення, за необхідності, додаткових водоохоронних рішень. Актуальність досліджень підтверджується важливістю підтримання екологічної безпеки гірничодобувної діяльності в межах Межирічного родовища, масштаби відпрацювання якого можуть збільшуватися в повоєнний період.

Стан водного середовища в гірничодобувних регіонах вивчали відомі вчені України. Їх дослідження стосувалися вирішення регіональних проблем щодо визначення основних природних і техногенних чинників впливу на якість підземних вод і регіонального прогнозування зміни їхньої якості під впливом закриття шахт (Сляднєв, 2006; Яковлєв та ін., 2021; Яковлєв та ін., 2022). Розглядалися також аспекти впливу на підземні та поверхневі води техногенних об'єктів гірничопромислового комплексу Калусько-Голинського родовища калійної солі (Іванов, 2013; Кузьменко та ін., 2024) та ДП «Роздільське гірничо-хімічне підприємство (ГПХ) «Сірка»» (Шабанова та ін., 2023). Аналіз попередніх досліджень і публікацій свідчить, що аспекти проблеми, які стосуються визначення впливу відкритого відпрацювання родовища розсіпних титанових руд на екологічний стан підземних вод і оцінювання ефективності передбачених водоохоронних заходів в умовах реалізації запроектованої діяльності, залишаються невирішеними. У зв'язку із цим перед автором постала доцільність оцінювання

інтенсивності впливу як окремих локальних об'єктів, так загалом промайданчика МГЗК на підземні води в межах розрахункової зони можливого порушення екологічного стану водних ресурсів.

Метою досліджень є оцінювання інтенсивності гідрохімічного впливу кар'єрного відпрацювання Межирічного родовища розсіпних титанових руд на підземні води з використанням даних післяпроектного моніторингу, проведеного в межах гірничодобувної діяльності ТОВ «Межиріченський ГЗК». Відповідно до поставленої мети для дослідження були визначені завдання, у перелік яких входять такі:

1. Розроблення методологічного підходу до оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води.

2. Оцінювання інтенсивності впливу МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод:

- аналіз сучасного гідрохімічного складу підземних вод;

- визначення основних репрезентативних забруднювальних речовин;

- визначення відносних середніх концентрацій забруднювальних речовин;

- вибір методики визначення інтенсивності впливу на забруднення підземних вод.

3. Оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод залежно від впливу конкретних технологічних об'єктів і промайданчика МГЗК загалом.

Матеріал і методи

Як основні матеріали для досліджень використовувалися дані післяпроектного моніторингу підземних вод у розрахунковій зоні потенційного впливу об'єктів ТОВ «Межиріченський ГЗК», отримані в період 2020–2022 рр. Проби води відбиралися під час маршрутних досліджень у пунктах спостережень на контрольних майданчиках вимірів, описів і відбору проб згідно з рекомендаціями (ДСТУ ..., 2005). Періодичність відбору проб – двічі на рік: у періоди весняної повені й осінньої межені. Згідно із програмою післяпроектного моніторингу кількість пунктів спостережної мережі – 7 колодязів і 5 свердловин. Усього за період досліджень було відібрано 60 проб підземних вод. У відібраних пробах води визначався вміст макрокомпонентів і специфічних для даної території хімічних речовин – марганцю і титану. Кількісне визначення показників проводилось з використанням стандартних методів під час виконання хіміко-аналітичних досліджень. Вплив гірничодобувної діяльності МГЗК на підземні води проявля-

ється зазвичай у зміні їхньої якості, тобто в забрудненні, а саме – у збільшенні вмісту властивих даній діяльності забруднювальних речовин: мінералізації (сухого залишку), сульфатів, хлоридів, показників жорсткості та специфічних речовин – марганцю й титану. Поняття «забруднення підземних вод» автор розуміє як конкретні кількісні показники якості підземних вод.

Методи дослідження. Для оцінювання впливу функціонування об'єктів МГЗК на підземні води використовувалися методи аналізу, обробки й узагальнення даних післяпроектного моніторингу; методи визначення інтенсивності забруднення підземних вод і методи порівняльного аналізу. Метод аналізу одержаних даних моніторингу полягав у визначенні найбільш характерних, властивих об'єктам МГЗК (репрезентативних), речовин і таких, що містяться в найбільших, порівняно з іншими, кількостях.

Метод обробки даних моніторингу полягав у визначенні відносних середніх концентрацій репрезентативних забруднювальних речовин. Відносні концентрації розраховувалися як відношення фактичних концентрацій компонентів до їх гранично допустимої концентрації (далі – ГДК).

Метод узагальнення даних моніторингу полягав у визначенні узагальнених характеристик забруднення підземних вод, як у межах впливу конкретних джерел, так загалом на території проммайданчика МГЗК. Для цього визначалися сумарні середні відносні концентрації забруднювальних речовин для кожного року проведення післяпроектного моніторингу, визначалися їхні зміни в часі. Розрахунки виконувалися для підземних вод на території проммайданчика МГЗК, гідрохімічний режим яких добре вивчений у процесі проведення післяпроектного моніторингу.

Метод визначення інтенсивності забруднення підземних вод. Для оцінювання ступеня забруднення підземних вод автором використаний порівняльний аналіз концентрацій: фонових; фактичних, одержаних у процесі моніторингових досліджень, і гранично допустимих концентрацій (ГДК), що встановлені в (ДСанПіН ..., 2010). Шляхом порівняльного аналізу проводилося зіставлення отриманих значень із ГДК, установленими для води питного призначення. Тобто визначалась зміна якості води порівняно з її якістю у природних умовах (з фоновими показниками) і з нормативними вимогами до цільового призначення водокористування.

Методологічний підхід до проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод. У межах промислового майданчика ТОВ «Межиріченський ГЗК» у наявності чотири основні об'єкти – техногенні джерела впливу на підземні води. Це кар'єр «Ісаківський», кар'єр «Південний», збагачувальна фабрика «Ісаківська» та збагачувальна фабрика «Південна». Наявність впливу зазначених об'єктів на підземні води та його інтенсивність можна визначити, якщо зафіксувати погіршення якості води. Під час проведення післяпроектного моніторингу важливо виділити дві основні стадії погіршення якості води, отже, залежно від них можна визначити наявність впливу гірничодобувної діяльності МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод, його інтенсивність (Лобода і Отченаш, 2017): *I стадія (дограничне забруднення)* – початкове забруднення, або ознаки забруднення, коли вміст забруднювальних речовин вищий за фоновий, але менший від ГДК. Для цієї стадії характерне зростання вмісту забруднювальних речовин у часі, хоча воно залишається нижче ГДК; *II стадія (надграничне забруднення)* – коли вміст забруднювальних речовин вищий за ГДК. Згідно з (Лобода і Отченаш, 2017), у стадії I доцільно виділяти 2-а ступеня початкового забруднення: I-а і I-б. У стадії II виділяються 3 ступені забруднення: II-а (А, Б), II-б (В, Г, Д), II-в. У поняття «забруднення» включаються обидва випадки, оскільки і на I і на II стадіях забруднення необхідна реалізація водоохоронних заходів. Інтенсивність впливу об'єктів МГЗК на забруднення підземних вод оцінювалася у два етапи й визначена на основі аналізу особливостей гідрогеологічних умов території, умов взаємозв'язку підземних і поверхневих вод, а також міграційних властивостей хімічних елементів у складі підземних вод.

На першому етапі визначалися відносні концентрації забруднювальних речовин і особливості їх зміни протягом проведення післяпроектного моніторингу. На другому етапі – за узагальненою сумарною середньоарифметичною щодо їх величиною розраховувалася інтенсивність забруднення підземних вод як загалом по території ТОВ «МГЗК», так і в зоні впливу конкретних джерел за період 2020–2022 рр.

Дослідження проводились у такій послідовності:

1) для проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу об'єктів ТОВ «МГЗК» на забруднення підземних вод визначалися основні, характерні для кар'єрних вод і для стічних вод збагачувальних фабрик МГЗК, забруднювальні речовини – репрезентативні показники впливу видобувної діяльності на хімічний склад підземних вод;

2) для виявлення забруднення підземних вод визначалися відносні концентрації забруднювальних речовин ($C_{\text{відн}}$) – (C), які розраховуються як відношення фактичної концентрації конкретного компонента (C) до його гранично допустимої концентрації (ГДК): $C = C / C_{\text{ГДК}}$;

3) для встановлення інтенсивності забруднення підземних вод визначалися середні арифметичні значення відносних концентрацій окремих компонентів у пробах води, відібраних у свердловинах і колодязях усередині локальних осередків забруднення;

4) для узагальнення характеристик забруднення підземних вод загалом на території проммайданчика МГЗК впродовж трьох років (термін проведення післяпроектного моніторингу) визначалися сумарні середні відносні концентрації забруднювальних речовин. На основі узагальнених характеристик визначалися градації інтенсивності та встановлювалися стадія та ступінь забруднення підземних вод. Градації інтенсивності забруднення підземних вод представлені в таблиці 1.

Градації I-а й I-б характеризують ті випадки забруднення, коли ще не перевищено ГДК, тобто вода належить до категорії «умовно забруднені води». Градації II-а (А, Б) і II-б (В, Г, Д) відповідають умовам, коли концентрація забруднювальних речовин перевищує їхні ГДК – категорія «забруднені води» (за різної інтенсивності – від 1–5 до 100). Градація II-в належить до категорії «екстремальне забруднення» (>100 ГДК). Варто зазначити, що для токсичних речовин «екстремальне забруднення» класифікується вже за $C = 10$ ГДК і за $C > 10$ ГДК. Залежно від інтенсивності забруднення підземних вод визначалася інтенсивність

впливу МГЗК на підземні води, на основі чого ухвалюються рішення щодо необхідності здійснення водоохоронної діяльності – коригування природоохоронних заходів, що запроєктовані.

Результати

Для оцінювання інтенсивності впливу гірничодобувної діяльності МГЗК на підземні води бралися дані післяпроектного моніторингу, одержані у спостережних пунктах, розміщених у межах зони активної дії основних техногенних джерел, як-от пункти можливого максимального навантаження на підземні води. Для контролю впливу кар'єру «Ісаківський» – Т. 103; кар'єру «Південний» – Т. 108, Т. 109; збагачувальної фабрики «Ісаківська» – Т. 115; збагачувальної фабрики «Південна» – Т. 102. Для оцінювання стану підземних вод у межах фонової ділянки – Т.107. Водночас проводився аналіз даних післяпроектного моніторингу за меженні періоди 2020–2022 рр. У такому разі враховуються найбільш жорсткі природні умови для формування хімічного складу підземних вод і більш надійно проявляється вплив техногенних чинників, тобто забезпечується запас надійності результатів дослідження.

Визначення основних репрезентативних забруднювальних речовин. Для проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на забруднення підземних вод вибрані такі хімічні елементи, характерні для кар'єрних вод і для стічних вод збагачувальних фабрик ТОВ «МГЗК»: *хлориди; сульфати; сухий залишок; марганець і показник загальної жорсткості*. Вони є репрезентативними показниками впливу видобувної діяльності з розроблення Межирічного родовища розсипних титанових руд на хімічний склад підземних вод. Вибір зазначених компонентів продиктований таким. Загальна жорсткість визначається наявністю магнію та кальцію у воді; хлориди та сульфати визначають зміну хімічних типів кар'єрних, стічних і підземних вод; сухий залишок визначається в основному наявністю макрокомпонентів, тобто ці показники дають чітке уявлення про стан підземних вод. Вибір із переліку

Таблиця 1

Градації інтенсивності забруднення підземних вод

№ градації	I-а	I-б	II-а		II-б			II-в
			А	Б	В	Г	Д	
Інтенсивність	<0,5	0,5–1	1–5	5–10	10–30	30–50	50–100	>100

контрольованих специфічних речовин марганцю зумовлений специфікою його поширення та міграції в підземних водах регіону.

Визначення відносних середніх концентрацій забруднювальних речовин. Інтенсивність забруднення підземних вод характеризується відносною середньою та відносною максимальною величиною забруднювальних речовин у середині контурів їх ГДК. У таблицях 2 і 3 наводяться відносні середні концентрації ($C_{\text{відн}}$) зазначених компонентів, розраховані в динаміці (на період літньої та осінньої межени 2020, 2021, 2022 рр.) за даними післяпроектного моніторингу.

Як випливає з таблиць (див. табл. 2 і табл. 3), спостерігаються перепади вмісту відносних концентрацій хімічних елементів у підземних водах на всій території, де

є пункти спостережної мережі моніторингу. Це свідчить про різну інтенсивність впливу як природних, так і техногенних чинників на хімічний склад підземних вод. У зв'язку із цим постала необхідність у виокремленні зон впливу кожного з потенційних джерел забруднення підземних вод на проммайданчику МГЗК. Для порівняння визначався хімічний склад підземних вод на фоновій щодо проммайданчика МГЗК території.

Особливості зміни в часі середньо-арифметичних значень відносних концентрацій хімічних елементів у підземних водах загалом по території проммайданчика МГЗК із 2020 р. до 2022 р. наведені в таблиці 4. Окрім того, для виявлення особливостей зміни інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води після закінчення терміну проведення післяпроектного моні-

Таблиця 2

Відносна концентрація ($C_{\text{відн}}$) хімічних компонентів у підземних водах
(за результатами моніторингу 2020–2021 рр.)

№ № точок опробування	Cl ⁻ , мг/дм ³	SO ₄ ⁻² , мг/дм ³	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість загальна, ммоль/дм ³	Mn, мг/дм ³
	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК
ГДК, мг/дм ³	350	500	1 500	10	0,10
2020 р.					
Т. 102	7,1	52,8	189,0	3,2	0,19
	0,020	0,106	0,126	0,32	1,9
Т. 103	23,1	148,8	386,0	4,4	0,074
	0,066	0,30	0,26	0,44	0,74
Т. 107	10,6	57,6	166,0	2,4	<0,02
	0,030	0,115	0,110	0,24	0,2
Т. 108	39,0	43,2	225,0	3,6	0,02
	0,111	0,086	0,15	0,36	0,2
Т. 109	24,8	76,8	186,0	3,0	0,02
	0,071	0,154	0,124	0,3	0,2
Т. 115	8,9	374,4	723,0	9,6	0,13
	0,025	0,75	0,482	0,96	1,3
2021 р.					
Т. 102	14,2	96,0	287,0	4,2	0,20
	0,041	0,192	0,192	0,42	2,0
Т. 103	21,3	96,0	263,0	2,6	0,07
	0,061	0,192	0,176	0,26	0,7
Т. 107	21,3	96,0	232,0	2,0	<0,02
	0,061	0,192	0,155	0,2	0,2
Т. 108	35,5	76,8	311,0	3,8	0,02
	0,102	0,154	0,207	0,38	0,2
Т. 109	28,4	144,0	303,0	3,6	0,02
	0,081	0,288	0,202	0,36	0,2
Т. 115	14,2	384,0	737,0	10,0	–
	0,041	0,768	0,492	1,0	–

Таблиця 3

Відносна концентрація ($C_{\text{відн.}}$) хімічних компонентів у підземних водах
(за результатами моніторингу 2022 р.)

№ № точок опробування	Cl ⁻ , мг/дм ³	SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	Сухий залишок, мг/дм ³	Жорсткість загальна, ммоль/дм ³	Mn, мг/дм ³
	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК	С/ГДК
ГДК, мг/дм ³	350	500	1500	10	0,10
Т. 102	14,2	96,0	287,0	4,2	0,20
	0,041	0,192	0,191	0,42	2,0
Т. 103	21,3	96,7	263,0	2,6	0,07
	0,061	0,193	0,175	0,26	0,7
Т. 107	21,3	96,0	232,0	2,0	<0,20
	0,061	0,192	0,155	0,2	2,0
Т. 108	35,5	76,8	311,0	3,8	0,02
	0,101	0,154	0,207	0,38	0,2
Т. 109	28,4	144,0	303,0	3,6	0,02
	0,081	0,288	0,202	0,36	0,2
Т. 115	14,2	384,0	737,0	10,0	0,05
	0,040	0,768	0,491	1,0	0,5

Таблиця 4

Середньоарифметичні значення інтенсивності забруднення підземних вод загалом по території проммайданчика ТОВ «МГЗК» за період досліджень у складі післяпроектного моніторингу 2020–2022 рр.

Період досліджень	Середньоарифметичне значення відносних концентрацій компонентів				
	($\bar{C}$), жорсткість	($\bar{C}$), сухий залишок	($\bar{C}$), Cl ⁻	($\bar{C}$), SO ₄ ²⁻	($\bar{C}$), Mn
2020 р.	0,437	0,208	0,054	0,252	0,757
2021 р.	0,437	0,237	0,065	0,298	0,660
2022 р.	0,547	0,282	0,081	0,394	0,930
За весь період досліджень	0,474	0,242	0,066	0,315	0,752
2024 р.	0,330	0,339	0,105	0,206	0,200

торингу автором проводився контроль їх забруднення у 2024 р.

Згідно з наведеними в таблиці даними (див. табл. 4), спостерігається тенденція до незначного зростання середньоарифметичних відносних концентрацій для всіх вибраних компонентів підземних вод. Найбільш помітне зростання характерне для 2022 р. Сумарна величина середньоарифметичних відносних концентрацій у 2020 р. становила 1,108; у 2021 р. – 1,697; у 2022 р. – 2,234. У середньому за 3 роки – 1,849.

У 2024 р. знизились середньоарифметичні відносні концентрації марганцю, сульфатів і жорсткості, а збільшилися – хлоридів і сухого залишку. Сумарна величина середньоарифметичних відносних концентрацій становила 1,180, тобто спостерігалось її зниження порівняно із 2021 і 2022 рр.

Оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод у меженні періоди 2020–2022 рр. Оцінювання погіршення якості підземних вод на території ТОВ «МГЗК», її змін у часі (упродовж проведення післяпроектного моніторингу) виконувалися шляхом визначення інтенсивності забруднення підземних вод за загальноприйнятою методикою (Лобода і Отченас, 2017).

На території проммайданчика загалом, а також у зонах впливу окремих об'єктів МГЗК, інтенсивність забруднення підземних вод визначалася за узагальненою сумарною середньоарифметичною відносною величиною жорсткості загальної, сухого залишку, хлоридів, сульфатів і марганцю (табл. 5).

За результатами розрахунків, загалом на території проммайданчика ТОВ «МГЗК» відносні середньоарифметичні концен-

Таблиця 5

Вихідні дані для розрахунків інтенсивності забруднення підземних вод загалом по території ТОВ «МГЗК» і в зоні впливу конкретних джерел за період 2020–2022 рр.

Об'єкти ТОВ «МГЗК»	($\bar{C}$), жорсткість	($\bar{C}$), сухий залишок	($\bar{C}$), хлор-іон	($\bar{C}$), сульфат-іон	($\bar{C}$), Мп
Зона впливу кар'єру «Ісаківський»	0,277	0,175	0,050	0,200	0,76
Зона впливу кар'єру «Південний»	0,337	0,172	0,106	0,158	0,20
Зона впливу збагачувальної фабрики «Південна»	0,373	0,159	0,030	0,137	1,97
Зона впливу збагачувальної фабрики «Ісаківська»	1,240	0,603	0,056	1,030	0,90
Фонова щодо проммайданчика МГЗК ділянка	0,340	0,232	0,059	0,260	0,71
Середньоарифметичне значення відносних концентрацій хімічних елементів у підземних водах загалом по території проммайданчика МГЗК	0,557	0,277	0,061	0,381	0,96

трації не перевищують ГДК: загальна жорсткість підземних вод дорівнює 0,557; сухого залишку – 0,277; хлоридів – 0,061; сульфатів – 0,381; марганцю – 0,96. Сумарна відносна середньоарифметична концентрація для вибраних типових забруднювальних компонентів загалом по території проммайданчика ТОВ «МГЗК» становить 2,236. Найбільший внесок у забруднення робить марганець – типовий для всього регіону елемент у підземних водах. Його сумарна середньоарифметична відносна концентрація в підземних

водах на території фонові ділянки становить 0,71.

Сумарні відносні концентрації забруднювальних речовин, розраховані для оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод у зонах впливу конкретних об'єктів МГЗК, їх розподіл за градаціями наведено в таблиці 6.

Ці концентрації потрібні як для характеристики кожної конкретної області впливу, так і для порівняння цих областей одна з одною, а також для визначення їхньої узагальненої характеристики.

Таблиця 6

Інтенсивність забруднення підземних вод за сумарною відносною середньоарифметичною концентрацією жорсткості, сухого залишку, хлоридів, сульфатів і марганцю в зонах впливу окремих джерел забруднення (за період 2020–2022 рр.)

№ градації	I-а	I-б	II-а		II-б			II-в
			А	Б	В	Г	Д	
Інтенсивність	<0,5	0,5–1	1–5	5–10	10–30	30–50	50–100	>100
	Зона впливу кар'єру «Ісаківський»							
			1,462					
	Зона впливу кар'єру «Південний»							
		0,973						
	Зона впливу збагачувальної фабрики «Ісаківська»							
			3,829					
	Зона впливу збагачувальної фабрики «Південна»							
			2,669					
Фонова ділянка			1,601					
Проммайданчик загалом			2,236					

Обговорення

Аналіз даних післяпроектного моніторингу, проведеного в період 2020–2022 рр., засвідчив наявність поступового зростання концентрацій забруднювальних речовин у зонах впливу кар'єрів і збагачувальних фабрик. Встановлено, що середньоарифметичні значення відносних концентрацій для ключових хімічних елементів мають тенденцію до підвищення, а сумарний рівень забруднення підземних вод на території проммайданчика МГЗК з 1,108 у 2020 р. зріс до 2,234 у 2022 р.

Як свідчать результати досліджень, у виділених зонах впливу конкретних джерел у межах проммайданчика МГЗК підземні води за інтенсивністю забруднення належать до градації II-а (А) – («забруднені води»), за винятком зони впливу кар'єру «Південний», де підземні води характеризуються інтенсивністю, що входить у градацію I-б («умовно забруднені води»). Узагалі інтенсивність забруднення підземних вод у зонах впливу збагачувальних фабрик вища, ніж у зонах впливу кар'єрів. Зокрема, у зоні впливу кар'єру «Ісаківський» вона становить 1,462, кар'єру «Південний» – 0,973, ЗФ «Ісаківська» – 3,829, ЗФ Південна» – 2,669. Максимальна інтенсивність забруднення підземних вод у градації II-а (А), що простежується в зоні впливу збагачувальних фабрик, може свідчити про наявність технологічних втрат зворотних вод на цих підприємствах і про можливий їхній вплив на підземну гідросферу. Узагальнена інтенсивність забруднення підземних вод на проммайданчику загалом становить 2,236. Водночас область забруднення підземних вод входить у градацію II-а (А) (категорія «забруднені води»).

Така ситуація може свідчити про наявність впливу гірничодобувної діяльності МГЗК на гідрохімічний режим підземних вод, отже, про ненадійність передбачених проектом і реалізованих водоохоронних рішень.

Проте варто врахувати, що підземні води на фоновій щодо проммайданчика МГЗК ділянці мають інтенсивність забруднення 1,601 і також відносяться до градації II-а (А) – до категорії «забруднені води». Тобто навіть за межами впливу проммайданчика загалом хімічний склад підземних вод характеризується підвищеним умістом компонентів, властивих і технології видобування та збагачення титанової руди (жорсткість загальна, сухий залишок і марганець). Отже,

метод порівняння дає змогу виявити наявність впливу на особливості формування забруднення підземних вод не лише гірничозбагачувального комплексу ТОВ «МГЗК». Причиною забруднення підземних вод, окрім техногенних чинників, можуть бути і природні (зокрема, кліматичні) фактори. Визначення їхнього внеску в забруднення надзвичайно важливе, оскільки від цього залежить оцінка надійності вже реалізованих водоохоронних заходів.

З огляду на те, що ступені забруднення підземних вод I-а й I-б та II-а (А) зазвичай спостерігаються поблизу порівняно невеликих за інтенсивністю джерел (Лобода і Отченаш, 2017), автор вважає, що інтенсивність впливу діяльності ТОВ «МГЗК» перебуває на рівні, який успішно можна знизити оперативною реалізацією додаткових водоохоронних заходів організаційного характеру. Зокрема, завдяки впровадженню запропонованих автором заходів щодо зниження технологічних втрат у процесі зворотного водокористування на збагачувальних фабриках інтенсивність забруднення підземних вод на проммайданчиках (яка у 2020 р. становила 1,108; у 2021 р. – 1,697; у 2022 р. – 2,236, а в середньому за 3 роки – 1,849) у 2024 р. знизилась до 1,180.

Отже, виділення ступенів інтенсивності забруднення підземних вод має сенс стосовно своєчасного здійснення водоохоронних заходів, упровадження яких є найбільш ефективним на стадіях I і II-а.

Підсумовуючи обговорення одержаних результатів досліджень, варто зазначити, що методологічний підхід, який використовувався для визначення інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води, поєднує в собі кількісний аналіз концентрацій забруднювальних компонентів із динамікою їх зміни в часі. Застосування методології градаційного оцінювання рівня забруднення дозволило не лише ідентифікувати наявність забруднення і оцінити інтенсивність негативних наслідків для водних ресурсів, а й визначити пріоритетність термінів першочергового впровадження водоохоронних заходів залежно від інтенсивності впливу конкретних джерел забруднення.

Порівняльний аналіз результатів досліджень з аналогами. Результати досліджень, одержані за розробленою автором методологією, являють собою показники екологічного стану водних ресурсів. Діапазон їх зміни дозволив оцінити не лише наявність чи відсутність забруднення та його інтен-

сивність, але й надійність водоохоронних заходів, уже впроваджених у технологію гірничозбагачувальної діяльності МГЗК. Це відрізняє їх від результатів, одержаних за використання традиційних підходів до проведення досліджень, коли оцінка забруднення часто є просто констатацією факту без аналізу ефективності природоохоронних заходів. Оскільки більшість аналогічних досліджень у гірничодобувних регіонах України орієнтована на регіональне оцінювання впливу на підземні води (зокрема, аналіз екологічної ситуації на Донбасі (Сляднєв, 2006; Яковлев та ін., 2021; Яковлев та ін., 2022) або в Калузько-Голинському родовищі калійної солі (Кузьменко та ін., 2024)) та на поверхневі води (оцінювання впливу об'єктів гірничо-хімічного підприємства ДП «Роздільське гірничо-хімічне підприємство (ГПХ) «Сірка»» на водні об'єкти (Шабанова та ін., 2023)), локальний підхід має особливу цінність. Він дозволяє оцінювати інтенсивність впливу локальних джерел на забруднення підземних вод, що є надзвичайно важливим для своєчасного й оперативного ухвалення водоохоронних рішень для конкретних умов відкритого відпрацювання на рівні окремих ділянок родовища.

Наукова новизна досліджень. У процесі проведення аналізу одержаних результатів досліджень варто відзначити наукову новизну реалізованої методології оцінювання інтенсивності впливу кар'єрного відпрацювання Межирічного родовища на підземні води. Наукова новизна досліджень полягає в розробленні методологічних принципів проведення оцінювання інтенсивності впливу гірничодобувної діяльності ТОВ «Межиріченський ГЗК» на підземну гідросферу, а також у визначенні напрямів адаптації методики оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод до оцінювання інтенсивності впливу МГЗК на їхній гідрохімічний режим. Методологія є досить ефективною і надає можливість на етапі післяпроектного моніторингу своєчасно вдосконалити водоохоронні аспекти прийнятої технології відпрацювання Межирічного родовища та технології збагачення титанової руди. Особлива цінність запропонованого підходу полягає в можливості його використання у вирішенні проблем, пов'язаних зі збільшенням техногенного тиску на підземні води в результаті відпрацювання інших родовищ титанової руди, наявних у регіоні.

Запропонована методологія оцінювання інтенсивності впливу кар'єрного видобутку Межирічного родовища титанових руд на підземні води є новим підходом, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз екологічного стану підземних вод у початковий період реалізації проєктованої діяльності. Серед її переваг можна виділити: локальний підхід до оцінювання інтенсивності забруднення, урахування динаміки зміни забруднення в часі, урахування специфіки титанових родовищ, а також можливість оцінювання ефективності природоохоронних заходів, можливість оперативного ухвалення рішень щодо вдосконалення природоохоронних заходів на етапі післяпроектного моніторингу.

Перевага запропонованого підходу до оцінювання впливу на підземні води полягає також у можливості виявлення початкової стадії забруднення, установлення стійкої тенденції погіршення якості підземних вод, навіть якщо не перевищуються гранично допустимі значення, своєчасного впровадження запобіжних заходів для унеможливлення розвитку подальшого забруднення.

Розроблена методологія може бути адаптована до діяльності інших гірничодобувних підприємств, що робить її універсальним інструментом післяпроектного моніторингу, результати якого можуть використовуватися екологічними службами для коригування природоохоронних заходів і розроблення стратегії мінімізації впливу на підземні води.

Висновки

З метою оцінювання рівня екологічної безпеки в умовах відкритої розробки Межирічного родовища розсипних титанових руд визначено методологічні принципи, запропоновано напрями дослідження та оцінено інтенсивність впливу гірничодобувної діяльності ТОВ «Межиріченський ГЗК» на підземні води на основі оцінювання інтенсивності забруднення підземних вод.

Виявлення інтенсивності впливу на підземні води, що відповідає початковій стадії забруднення, особливо необхідне у зв'язку із профілактичними заходами щодо запобігання забрудненню підземних вод, запобігання його розвитку, якщо воно вже почалося (ступені забруднення I-а й I-б, II-а (A)).

Одержані результати свідчать про доцільність коригування вже реалізованих водоохоронних заходів і слугують підґрунтям для встановлення тенденції та прогнозу зміни в часі екологічного стану підземних

вод в умовах реалізації технології гірничодобувної діяльності МГЗК.

Методологічний підхід, розроблений для оцінювання інтенсивності впливу МГЗК на підземні води, має широкі перспективи застосування в умовах діючих кар'єрів на етапі початкового періоду відпрацювання родовищ корисних копалин у різних гірничодобувних регіонах України.

Варто зазначити, що встановлена у 2020–2022 рр. тенденція збільшення середньоарифметичних відносних концентрацій забруднювальних речовин у підземних водах зумовлює необхідність виконання прогностичних розрахунків на основі вірогідного моделювання числових рядів. Це дозволить виявити роль випадкових і закономірних процесів у формуванні якості підземних вод і встановити причину тенденції збільшення концентрацій зазначених компонентів у підземних водах як на території промайданчика МГЗК загалом, так і на території фонові ділянки. На основі результатів прогнозу буде визначатися доцільність коригування реалізованих водоохоронних заходів.

Практичне застосування одержаних результатів. Оцінювання інтенсивності впливу об'єктів МГЗК на підземні води та виявлення їх початкового забруднення мають досить велике практичне значення, оскільки дозволяють оперативно реагувати на появу небезпечних змін гідрохімічного режиму. Одержані результати на етапі досліджень у складі післяпроектного моніторингу вже можуть використовуватися для ухвалення рішень щодо вдосконалення природоохоронних заходів в умовах прийнятої технології видобування та збагачення титанової руди.

Рекомендації щодо перспективи проведення подальших досліджень. Проведення досліджень з оцінювання інтенсивності впливу на забруднення підземних вод рекомендується продовжити в умовах запланованого розширення території видобувної діяльності ТОВ «МГЗК». Це дасть змогу виявити найбільш екологічно небезпечні ділянки в межах промайданчика, визначити напрямки поширення можливого забруднення в зонах впливу нових об'єктів і своєчасно знизити техногенне навантаження на водне середовище.

Список використаної літератури

ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною [Чинний від 12.05.2010 р.]. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2010 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 04.02.2025).

ДСТУ ISO 5667-11:2005. Якість води. Відбирання проб. Ч. 11. Настанови щодо відбирання проб підземних вод [Чинний від 01.07.2006 р.]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005.

Іванов Є., Сивий М., Паранько І. Географія мінеральних ресурсів України : монографія. Львів : Простір М, 2013. 684 с.

Кузьменко Е., Багрій С., Чепурний І., Чепурна Т. Моніторингові дослідження еколого-гідрогеохімічної ситуації в зоні впливу техногенних об'єктів гірничопромислового комплексу Калуш-Голинського родовища калійної солі. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2024. Т. 15. № 2. С. 83–95. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.83>.

Лобода Н., Отченаш Н. Підземні води, їх забруднення та вплив на навколишнє середовище : навчальний посібник. Одеса : ОДЕУ, 2017, 199 с.

Сляднєв В. Оцінка впливу уразливості підземних вод на екологічну безпеку Центрального Донбасу в умовах закриття вугільних шахт : дис. ... канд. геол. наук : 21.06.01. Київ, 2006, 171 с.

Шибанова А., Мітрясова О., Джумеля Е., Руда М. Оцінювання впливу відходів гірничо-хімічних підприємств на якість поверхневих вод. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. Т. 45. № 1. С. 17–28. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.17-28>.

Яковлєв Є., Сплодитель А., Чумаченко С. Оцінка еколого-геохімічного стану поверхневих вод Донбасу. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. Т. 28. С. 129–137 [Електронний ресурс]. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/37091> (дата звернення: 16.01.2025).

Яковлєв Є., Пиріков О., Анпілова Є., Чумаченко С. Оцінення і прогнозування змін екологічного стану підземної і поверхневої гідросфери Донбасу на етапі постмайнінгу. *Мінеральні ресурси України*. 2022. № 1. С. 43–51 [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2022_1_8 (дата звернення: 16.01.2025).

References

- Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy (2010). Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznache-noi dlia spozhivannia liudynoiu [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption] (DSanPiN 2.2.4-171-10). [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (access date 12.01.2025) [in Ukrainian].
- Derzhspozhyvstandart Ukrainy (2005). DSTU ISO 5667-11:2005. Yakist vody. Vidbyrannia prob. Chastyna 11. Nastanovy shchodo vidbyrannia prob pidzemnykh vod [Water quality. Sampling. Part 11. Guidance on sampling of groundwater]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
- Ivanov, Y., Syvyi, M., & Paranko, I. (2013). Heohrafiia mineralnykh resursiv Ukrainy: Monohrafiia [Geography of mineral resources of Ukraine: Monograph]. Prostir M [in Ukrainian].
- Kuzmenko, E., Bahrii, S., Chepurnyi, I., & Chepurna, T. (2024). Monitorynhovi doslidzhennia ekoloho-hidroheokhimichnoi sytuatsii u zoni vplyvu tekhnohennykh ob'ektiv hirnychopromyslo-voho kompleksu Kalush-Holynskoho rodovyshcha kalinoi soli [Monitoring studies of the ecological-hydrogeochemical situation in the impact zone of technogenic objects of the Kalush-Holyn potash deposit mining-industrial complex]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia* [Environmental safety and sustainable resource use], 15 (2), 83–95. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.83> [in Ukrainian].
- Loboda, N., & Otchenash, N. (2017). Pidzemni vody, yikh zabrudnennia ta vplyv na navkolyshnie seredovyshche [Groundwater, its pollution and environmental impact]. Odesa : ODEU [in Ukrainian].
- Sliadniev, V. (2006). Otsinka vplyvu urazlyvosti pidzemnykh vod na ekolohichnu bezpeku Tsentralnoho Donbasu v umovakh zakryttia vuhilnykh shakht [Assessment of the impact of groundwater vulnerability on the environmental safety of the Central Donbas in the context of coal mine closure] (Candidate dissertation). Instytut heokhimii navkolyshnoho seredovyshcha NAN i MNS Ukrainy, Kyiv [in Ukrainian].
- Shybanova, A., Mitriasova, O., Dzhumelia, E., & Ruda, M. (2023). Otsiniuvannia vplyvu vidkho-div hirnycho-khimichnykh pidpriemstv na yakist poverkhnevykh vod [Assessment of the impact of mining-chemical enterprise waste on the quality of surface waters]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia* [Environmental safety and nature management], 45 (1), 17–28. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.17-28> [in Ukrainian].
- Yakovlev, Y., Splodytel, A., & Chumachenko, S. (2021). Otsinka ekoloho-heokhimichnoho stanu poverkhnevykh vod Donbasu [Assessment of the ecological-geochemical state of surface waters in Donbas]. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal* [Ukrainian Hydrometeorological Journal], 28, 129–137. [Electronic resource] URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/37091> (access date 16.01.2025) [in Ukrainian].
- Yakovliev, Ye., Pyrykov, O., Anpilova, Ye., & Chumachenko, S. (2022). Otsinennia i prohnozuvannia zmin ekolohichnoho stanu pidzemnoi i poverkhnevoi hidrosfery Donbasu na etapi postmainihu [Assessment and forecasting of changes in the ecological state of the underground and surface hydrosphere of Donbas at the post-mining stage]. *Mineralni resursy Ukrainy* [Mineral resources of Ukraine], 1, 43–51. [Electronic resource] URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2022_1_8 (access date 16.01.2025) [in Ukrainian].

Отримано: 03.03.2025

Прийнято: 15.05.2025