УДК 528.88:504.064.4.03
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.17

ГІДРО-ГЕОЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ГЛИБИНИ ВІДКРИТОЇ РОЗРОБКИ ГУЛЯЙПІЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ З УРАХУВАННЯМ ДЕПРЕСІЙНОЇ ЛІЙКИ ТА НАПРЯМІВ СТОКУ

Касьяненко Д.Л. (orcid.org/0009-0008-8344-1958)
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Липківського В. Митрополита, 35, к. 2, 03035,Київ
law@kasyanenko.com.ua

Окреслено гідро-екологічне обґрунтування доцільної глибини відкритої розробки Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів з урахуванням особливостей геологічної будови, водоносності гірського масиву, параметрів фільтрації, напрямів природного поверхневого стоку та прогнозованої зміни гідродинамічного режиму. Гуляйпільське родовище характеризується складною багатопластовою гідрогеологічною системою, у межах якої встановлено сім водоносних горизонтів. Основними водоносними комплексами, що визначають обводнення території, є безнапірний полтавсько-харківський горизонт, а також напірні горизонти кори вивітрювання і тріщинуватих докембрійських кристалічних порід.

Уточнено підхід до оцінки радіусу депресійної лійки при прогнозованої глибині кар'єру 400 м. Для попередньої оцінки застосовано емпіричну залежність Кусакіна та розглянуто діапазон можливого зниження рівня в основному безнапірному горизонті. Розрахунок радіусу депресійної лійки 13,2 км для кар'єру глибиною 400 м не слід використовувати як остаточний науковий результат, оскільки в ньому глибина кар'єру фактично ототожнюється зі зниженням рівня води. Для водоносного горизонту потужністю близько 35 м це фізично некоректно. Альтернативна оцінка на основі модуля підземного стоку, за якою радіус становить близько 7,3 км також має сенс. Але, показано, що при зниженні рівня на 10–35 м орієнтовний радіус впливу може становити близько 0,32–1,13 км за прийнятих середніх параметрів горизонту, тоді як для всієї багатопластової системи реальна зона впливу може бути істотно більшою і потребує чисельного моделювання.

Встановлено, що природний поверхневий стік території спрямований до ярково-балкової мережі, зокрема балок Гончариха, Різана, Шестипол'є, Солона, Попова та Кучерявська. Формування відкритого кар'єрного простору змінює гідрологічний градієнт і створює умови для концентрації поверхневого та підземного стоку в напрямку гірничої виробки. На основі комплексного аналізу запропоновано розглядати глибину 400 м як гідрогеоекологічно обґрунтовану межу відкритої розробки за умови створення ефективної системи дренажу, моніторингу рівнів підземних вод та подальшого переходу до підземного видобування.
Ключові слова: Гуляйпільське родовище, залізисті кварцити, кар'єр, підземні води, депресійна лійка, водоприплив, коефіцієнт фільтрації, поверхневий стік, гідрогеологічний режим, комбінований спосіб розробки, екологічна безпека.

Hydrogeoecological justification of the depth of open-cast mining at the Hulyaypil iron-bearing quartzite deposit, taking into account the depression cone and drainage patterns. Kasyanenko D.

This article presents a hydrogeo-ecological justification for the optimal depth of open-cast mining at the Hulyaypil iron-bearing quartzite deposit, taking into account the characteristics of the geological structure, the aquifer capacity of the mountain massif, filtration parameters, the directions of natural surface runoff, and the predicted changes in the hydrodynamic regime. The Hulyaypil deposit is characterised by a complex, multi-layered hydrogeological system, within which seven aquifers have been identified. The main aquifer complexes determining the water supply to the area are the unconfined Poltava–Kharkiv aquifer, as well as the confined aquifers of the weathering crust and fractured Precambrian crystalline rocks.

The approach to estimating the radius of the depression funnel has been refined for a projected quarry depth of 400 m. For a preliminary assessment, Kusakin's empirical relationship was applied and the range of possible water level drawdown in the main unconfined aquifer was considered. The calculated depression funnel radius of 13.2 km for a 400-metre-deep quarry should not be regarded as a definitive scientific result, as it effectively equates the quarry depth with the water level drawdown. For an aquifer with a thickness of approximately 35 metres, this is physically incorrect. An alternative estimate based on the underground flow modulus, which gives a radius of approximately 7.3 km, is also plausible. However, it has been shown that with a water level drop of 10–35 m, the approximate radius of influence may be around 0.32–1.13 km under the assumed average aquifer parameters, whereas for the entire multi-layer. *Key words:* Gulyaypil deposit, ferruginous quartzites, quarry, groundwater, depression cone, inflow, filtration coefficient, surface runoff, hydrogeological regime, combined mining method, environmental safety.

© Касьяненко Д.Л., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Розвиток гірничодобувної промисловості супроводжується масштабною трансформацією геологічного середовища. Особливо значний вплив виникає під час відкритої розробки потужних крутопадаючих рудних тіл, коли формування глибокого кар'єрного простору супроводжується розкриттям декількох водоносних горизонтів, зміною гідрогеологічного балансу та необхідністю постійного водовідливу. При цьому глибина кар'єру безпосередньо визначає вертикальний інтервал порушення гірського масиву, однак не є тотожною величині зниження рівня підземних вод, що необхідно враховувати при оцінюванні зони гідрогеологічного режиму.

Одним із найбільш суттєвих наслідків тривалого водовідливу є формування депресійної лійки, розміри якої залежать від водопровідності, коефіцієнту фільтрації, потужності та водовіддачі водоносних горизонтів, а також інтенсивності й тривалості дренування. У багатопластовій гідрогеологічній системі зона впливу кар'єру може поширюватися за межі його безпосереднього контуру та охоплювати суміжні водоносні комплекси, що створює передумови для зміни напрямів і швидкості фільтраційних потоків.

Додатковим фактором гідрогеоекологічної трансформації є зміна природного поверхневого стоку внаслідок формування великої від'ємної форми рельєфу. Глибокий кар'єр може перехоплювати частину поверхневого та підземного стоку, змінювати положення вододілів локального рівня та спрямовувати водні потоки до системи водовідливу. У результаті порушується природний розподіл водного балансу між атмосферними опадами, поверхневим стоком, інфільтрацією та підземним стоком.

У зв'язку з цим виникає наукова та практична проблема визначення такої глибини відкритої розробки, за якої забезпечується раціональне освоєння мінеральних ресурсів за одночасного обмеження негативного впливу на підземні та поверхневі води.

Для її вирішення необхідне комплексне врахування не лише гірничотехнічних параметрів родовища, а й гідрогеологічних характеристик водоносних горизонтів, величини прогнозованого водоприпливу, параметрів депресійної лійки, природних напрямів поверхневого стоку та їх можливої трансформації під впливом гірничих робіт. Такий підхід дозволяє перейти від оцінювання впливу кар'єру лише за його геометричними параметрами до визначення просторової зони фактичної гідрогеоекологічної трансформації території.

Актуальність дослідження. Особливої актуальності проблема набуває для родовищ, у межах яких водоносні горизонти мають різні фільтраційні властивості та гідравлічний зв'язок між собою. У таких умовах поглиблення кар'єру може послідовно залучати до водообміну нові водоносні комплекси, змінювати гідродинамічні градієнти та збільшувати обсяг дренажних вод. Водночас локальні зони підвищеної тріщинуватості кристалічних порід можуть створювати шляхи інтенсивної фільтрації та зумовлювати нерівномірний просторовий розподіл водоприпливу.

Гуляйпільське родовище (ГПР) залізистих кварцитів (ЗК) є перспективним об'єктом відкритої розробки. Родовище має складну геологічну будову, круте падіння рудних тіл і значну вертикальну потужність [1]. Площа ГПР становить 936 га, протяжність продуктивного пласта – близько 17 км, середня потужність розкриву – близько 120 м, а розвідана глибина запасів сягає 600 м. Саме значна глибина залягання рудного тіла створює принципове питання щодо межі економічно та екологічно прийнятної відкритої розробки.

Актуальність дослідження зумовлена також необхідністю кількісного оцінювання просторових меж гідрогеологічного впливу глибоких кар'єрів. Дослідження [2] показали, що визначення радіуса впливу шахтного дренажу є складним завданням, оскільки форма і поширення депресійної лійки залежать від неоднорідності водоносного середовища, геологічної будови та наявності тектонічних порушень. Автори підкреслюють, що в реальних умовах депресійна область не має чіткої межі, а її конфігурація може істотно відрізнятися від ідеалізованої осесиметричної моделі. Математичне визначення радіусу впливу було вперше сформульовано Дюпюї ще у 1863 р. як верхня межа інтегрування в диференціальному рівнянні, розв'язком якого є формула притоку води у свердловину в умовах стаціонарного потоку ґрунтових вод. Але, особливість шахти чи кар'єру полягає в тому, що, на відміну від колодязя, радіус впливу стоку з виробок зазвичай охоплює різні водоносні горизонти на площі, яка іноді становить кілька тисяч км^2. Отже, актуальність дослідження ГПР визначається необхідністю поєднання гірничотехнічних параметрів з кількісними гідрогеологічними характеристиками.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення актуального науково-практичного завдання гідрогеоекологічного обґрунтування параметрів відкритої розробки ГПР ЗК з урахуванням трансформації природного гідрогеологічного та гідрологічного режимів території. Необхідність такого дослідження обумовлена значною глибиною поширення рудних покладів, складною будовою водоносної системи та потенційним формуванням значного водоприпливу при поглибленні кар'єру.

Попередні дослідження Гуляйпільського родовища були спрямовані на комплексну оцінку потенційного впливу його промислового освоєння на компоненти довкілля [3]. У науковій праці [4] окреслено аналіз базового стану природного середовища та прогнозованих змін унаслідок відкритої розробки родовища. Розвитком цього напряму є запропоно-

ване в даній роботі поглиблення гідрогеоекологічної складової оцінювання. Основна увага зосереджується на встановленні взаємозв'язку між глибиною відкритої гірничої виробки, параметрами водоносних горизонтів, коефіцієнтами фільтрації, величиною водоприпливу, формуванням депресійної лійки та зміною напрямів поверхневого і підземного стоку.

Важливим аспектом авторського доробку є розмежування поняття глибини кар'єру та величини зниження рівня підземних вод. Глибина кар'єру визначає геометричний масштаб втручання у геологічне середовище, тоді як величина зниження рівня води залежить від умов дренування, гідравлічних властивостей водоносних горизонтів, їх потужності, водопровідності та гідравлічного зв'язку з іншими водоносними комплексами. Це дозволяє коректніше визначати радіус депресійної лійки та просторову зону гідрогеологічного впливу.

Практичне значення наукової праці – використання отриманих результатів під час обґрунтуванні проектних параметрів кар'єру, виборі технологічної схеми видобування, визначенні необхідності та масштабів водовідливу, формуванні системи гідрогеологічного моніторингу та плануванні природоохоронних заходів.

Методи досліджень. Методична основа дослідження сформована на основі аналізу геологічних, гідрогеологічних та геоморфологічних даних ГПР, а також сучасних наукових підходів до оцінки впливу відкритих гірничих робіт на водні ресурси. Застосовано наступні методи досліджень: аналіз геологічної та гідрогеологічної інформації; порівняльний аналіз технологічних сценаріїв; морфометричний аналіз рельєфу земної поверхні; математичний розрахунок та аналіз напрямів поверхневого стоку; оцінювання фільтраційних властивостей водоносних горизонтів; аналітичну оцінку радіусу впливу водовідливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для України ця проблема є особливо актуальною для залізорудних районів, де багаторічне функціонування гірничих підприємств уже призвело до істотної трансформації природного рельєфу та гідрогеологічного режиму. За даними [6], тривала розробка родовищ Кривбасу змінила геоморфологічну та гідрогеологічну структуру території, а щорічний обсяг дренажних вод у регіоні оцінювався приблизно в 1 км³.

Сучасні дослідження Криворізького басейну також показують, що неоднорідність водоносних товщ, тріщинуватість кристалічних порід, техногенні колектори у відвалах та зміна фільтраційних потоків формують депресійні області, які можуть поширюватися за межі безпосереднього контуру кар'єру. В дослідженнях [7] підкреслено, що водовідлив впливає не лише на рівень підземних вод, а й на напружено-деформований стан масиву, стійкість бортів та процеси деформації поверхні.

Подібні закономірності встановлені й у міжнародних дослідженнях Наприклад, в роботі [8], де за допомогою синтетичного чисельного моделювання підземних вод із використанням MODFLOW, автори моделювали умовний великий кар'єр, який експлуатувався протягом 20 років, після чого моделювали відновлення рівнів підземних вод протягом 100 років. Моделювання відновлення рівня підземних вод після закриття відкритих гірничих виробок показало, що масштаб депресійної області визначається не тільки величиною водовідбору, а й водопровідністю та водовіддачею водоносного горизонту. Тому визначення оптимальної глибини відкритої розробки повинно здійснюватися не лише за гірничотехнічними або економічними критеріями, а й з урахуванням гідрогеологічних обмежень.

Отже, аналіз сучасних досліджень засвідчує, що оцінювання впливу відкритих гірничих робіт на гідрогеологічне середовище поступово переходить від локального визначення водоприпливу до комплексного просторового аналізу водоносної системи.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття. Незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень, у сучасних роботах враховуються неоднорідність фільтраційних властивостей, гідравлічний зв'язок між горизонтами, тріщинуватість масиву, параметри водовідливу, поверхневий стік та довготривала зміна рівнів підземних вод. Разом з тим, для умов ГПР ЗК залишається недостатньо дослідженим питання комплексного взаємозв'язку глибини відкритої розробки, водоприпливу, параметрів депресійної лійки, фільтраційних властивостей окремих водоносних горизонтів та зміни напрямів поверхневого стоку. Особливого значення набуває визначення того, як змінюється гідрогеологічна зона впливу при переході від кар'єру глибиною 400 м до глибшої відкритої розробки, а також оцінювання переваг комбінованої схеми «кар'єр – підземна розробка».

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у комплексному гідрогеоекологічному оцінюванні впливу відкритої розробки Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів до глибини 400 м з одночасним урахуванням гідрогеологічної будови території, фільтраційних властивостей водоносних горизонтів, прогнозованого водоприпливу, формування депресійної лійки та трансформації природних напрямів поверхневого стоку. Уточнено просторову схему гідрогеологічного впливу глибокої кар'єрної виїмки шляхом розмежування геометричної глибини кар'єру та фактичної величини зниження рівня підземних вод. Це дозволяє розглядати депресійну лійку не як безпосереднє продовження контуру кар'єру, а як самостійну просторову область зміни гідродинамічного режиму, параметри якої визначаються властивостями конкретного водоносного горизонту. Удосконалено підхід до оцінювання зони гідрогео-

логічного впливу шляхом спільного врахування коефіцієнта фільтрації, потужності водоносного горизонту та величини зниження рівня підземних вод при визначенні параметрів депресійної лійки.

Виклад основного матеріалу. Гуляйпільське родовище (рис. 1) розташоване на північно-західній окраїні Консько-Ялинського малого артезіанського басейну в межах області тріщинних вод Українського кристалічного масиву.

У межах родовища встановлено сім водоносних горизонтів (табл. 1). Найбільше значення для формування водоприпливу мають: четвертинний, полтавсько-харківський, харківський, бучацький, верхньокрейдовий, горизонт кори вивітрювання та води тріщинних зон докембрійських кристалічних порід.

Четвертинний горизонт має потужність 5–11 м, вільну поверхню, а рівень ґрунтових вод залягає на глибині 1,2–3,8 м. Його багатоводність характеризується як слабка.

Найбільше значення для відкритої розробки має полтавсько-харківський водоносний горизонт. У межах проектованої зони його потужність становить приблизно 19–49 м. Горизонт безнапірний, має гідравлічний зв'язок із нижчими горизонтами, а рівні води загалом знижуються у напрямку зі сходу на захід. Коефіцієнт фільтрації змінюється від 0,8 до 14,8 м/добу, водопровідність – від 34 до 249 м²/добу, питомий дебіт свердловин досягає 5,13 м³/год.

Особливе значення має горизонт тріщинних вод докембрійських кристалічних порід. Його водоносність безпосередньо залежить від ступеня тріщинуватості та вивітрілості. Найбільш інтенсивні тріщинні зони простежуються в інтервалі приблизно 100–200 м, а коефіцієнт фільтрації за окремими зонами може досягати 10,8 м/добу. Це означає, що гідрогеологічна система родовища не може розглядатися як однорідний водоносний пласт. Вона являє собою взаємопов'язану систему осадових і тріщинних колекторів із різними параметрами фільтрації.

Загальний прогнозований водоприплив до кар'єру становить до 1500 м³/год, а за окремими розрахунками експлуатаційний приплив підземних вод може становити 700–1200 м³/год; разом з атмосферним стоком – близько 1100–1500 м³/год.

Формування депресійної лійки є одним із ключових гідрогеологічних наслідків глибокого кар'єрного водовідливу. У процесі відкачування води з гірничої виробки відбувається зниження рівня підземних вод. Навколо зони водовідливу формується область понижених напорів, а градієнт фільтраційного потоку



Рис. 1. Деталізація фактичного матеріалу району досліджень

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 1

Основні гідрогеологічні характеристики водоносних горизонтів ГПР

Водоносний горизонт	Характер залягання	Орієнтовна потужність, м	Коефіцієнт фільтрації, м/добу	Гідрогеологічна характеристика	Значення для кар'єру
Четвертинний	Безнапірний	5–11	–	Ґрунтові води, рівень 1,2–3,8 м	Формування поверхневого та ґрунтового стоку
Полтавсько-Харківський	Безнапірний	19–49	0,8–14,8	Найбільш значущий верхній водоносний горизонт	Основний об'єкт депресії
Харківський	Напірний/ напівнапірний	змінна	–	Гідравлічний зв'язок з іншими горизонтами	Можливий перерозподіл напорів
Бучацький	Напірний	змінна	–	Глибший водоносний комплекс	Потенційне залучення при поглибленні
Верхньокрейдовий	Напірний	змінна	–	Розвинений локально	Потенційна зона гідравлічного впливу
Кора вивітрювання	Напірний/ тріщинний	змінна	до 10,8	Пов'язана з тріщинуватістю кристалічних порід	Важливий фактор водоприпливу
Тріщинні води докембрійських порід	Тріщинний	значна вертикальна потужність	до 10,87	Водоносність контролюється тріщинуватістю	Потенційно значний приплив при глибокому кар'єрі

Таблиця 2

Вихідні дані для основного Полтавсько–Харківського безнапірного водоносного горизонту

№	Параметр	
1	Коефіцієнт фільтрації K	7,8 м/добу
2	Потужність горизонту H	35 м
3	Глибина кар'єру	400 м
4	Прогнозний водоприплив	850 -1600 м³/год

змінює природний напрямок у бік кар'єру. Сучасні дослідження підтверджують, що площа впливу водовідливу може значно перевищувати площу самого відкритого гірничого об'єкта. Наприклад, у модельному дослідженні [8] після 20 років водовідливу зона зниження рівня понад 10 м поширювалася приблизно на 12 км за сприятливих для фільтрації умов і на 6,5 км за меншої водопровідності.

Гідрогеологічні умови Гуляйпільського родовища дозволяють визначити радіус депресійної лійки для сценарію - кар'єр до 400 м. Вихідні дані для основного полтавсько–харківського безнапірного водоносного горизонту (табл. 1) беремо як середні параметри (табл. 2).

Радіус депресійної лійки при використанні формули Прокладкіна або Кусакіна для безнапірного горизонту має наступний вигляд:

$$R=2S\sqrt{K\cdot H}$$

де: R – радіус депресійної лійки, м; K – коефіцієнт фільтрації, м/добу; H - потужність горизонту, м; S – величина зниження рівня води (глибина кар'єру), м.

Тобто, маємо $R=2\cdot 400\sqrt{7,8\cdot 35}=3216$ м або R=13.218км

При цьому, площа депресійної лійки розраховується за формулою:

$$F=\pi R^2$$

де: F – площа депресійної лійки, м²; R – радіус депресійної лійки, м

$$F=3.14\cdot 13,218^2=548.6 \text{ км}^2$$

При радіусі впливу близько 13 км (рис. 2) зона депресії виходить далеко за межі контуру кар'єру та охоплює значну частину прилеглої території. Це свідчить про високу ймовірність зниження рівнів ґрунтових вод, порушення природного гідрогеологічного режиму і необхідність застосування системи дренажних та природоохоронних заходів.

Радіус депресії (R) можна розрахувати ще за одною схемою. Це буде оцінка для умов активного взаємозв'язку усіх обводнених порід при вскри-

ванні і розробці родовища – покривних (надрудних) осадових і тріщинуватих рудно-кристалічних порід. З врахуванням значення модулю підземного стоку М, який дуже орієнтовно варіює в межах М~0.5÷ 3.0 дм^3/сек·км^2=43-260 м^3/добу·км^2.

Тоді при критичному водоприпливі Q =1800 м^3/год = 43200 м^3/добу максимальний радіус депресії R може досягти

$$R=(\frac{Q}{A}\cdot M)*0.5$$

де: Q - максимальний водоприплив, м^3/добу; R - радіус депресії, км; М - модуль підземного стоку, дм^3/сек·км^2

$$R= (43200/3.14\cdot 260)*0.5=7.3км$$

Цей розрахований радіус депресії в 7,3 км (рис. 2) майже в 1,8 рази менш ніж при першому сценарію.

Але, попередній розрахунок депресійної лійки для сценарію кар'єру до 400 м., де для розрахунку прийнято що глибина кар'єру (400 м) фактично прирівнювалася до величини зниження рівня (S), потребує методичного уточнення.

Для безнапірного горизонту з потужністю близько 35 м максимальне повне осушення саме цього горизонту не може бути інтерпретоване як зниження рівня на 400 м. Якщо для попередньої оцінки розглянути зниження рівня (S) на 10, 20, 30 та 35 м, отримаємо значно меншу площу впливу (табл. 3).

Розрахунок демонструє важливий результат: для конкретного полтавсько-харківського горизонту радіус депресійної лійки визначається не глибиною кар'єру як такою, а фактичним зниженням рівня води, потужністю горизонту та коефіцієнтом фільтрації. Разом з тим наведені значення не слід трактувати як остаточний прогноз. Гуляйпільське родовище має гідравлічно пов'язані горизонти, зокрема полтавсько-харківський горизонт, кору вивітрювання та тріщинні докембрійські породи. Тому фактична зона впливу всієї системи може бути більшою за аналітичний радіус, отриманий для одного горизонту. Саме тому для проектних рішень доцільним може бути чисельне моделювання фільтрації.

Загальний висновок полягає в тому, що розрахований радіус депресійної лійки в 13,2 км, не є достовірно визначений. Його можна згадувати лише як попередню, методично спрощену оцінку, яка потребує перевірки. Альтернативна оцінка на основі модуля підземного стоку, за якою радіус становить близько 7,3 км також має сенс. Такий розкид результатів – від близько 1 км для окремого горизонту до кількох кілометрів для інтегрованої системи – є аргументом на користь багатошарової чисельної моделі.

Наприклад, показовим аналогом для оцінювання гідрогеологічного впливу залізорудної відкритої розробки є кар'єр Хоуп-Даунс-Норт (Західна Австралія). За фактичними моніторинговими даними [9], при експлуатації кар'єру унаслідок дренування, рівень підземних вод знижувався приблизно на 75–130 м, а зона гідрогеологічного впливу поширювалася приблизно на 6–8 км від гірничої виробки. Порівняння отриманих розрахункових параметрів для ГПР ЗК

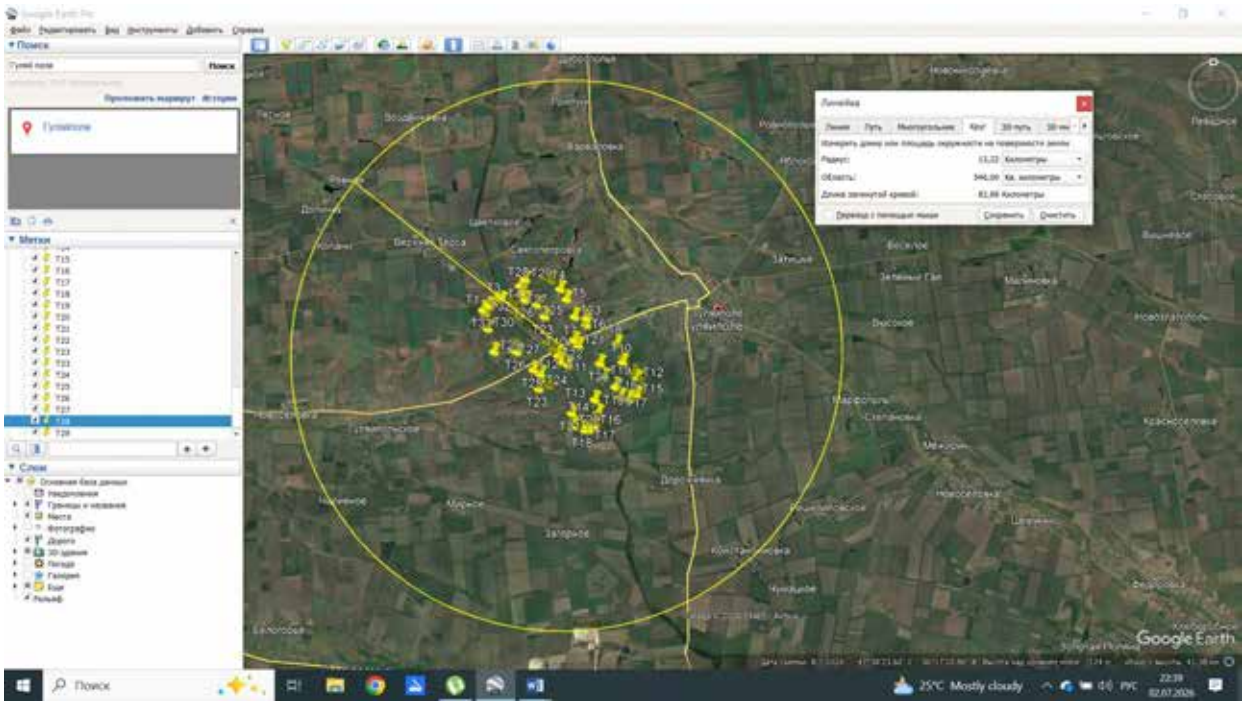


Рис. 2. Зона депресії майбутнього кар'єру до 400 м відпрацювання (основа - наведені координати Західного і Східного покладів), R-13.21км

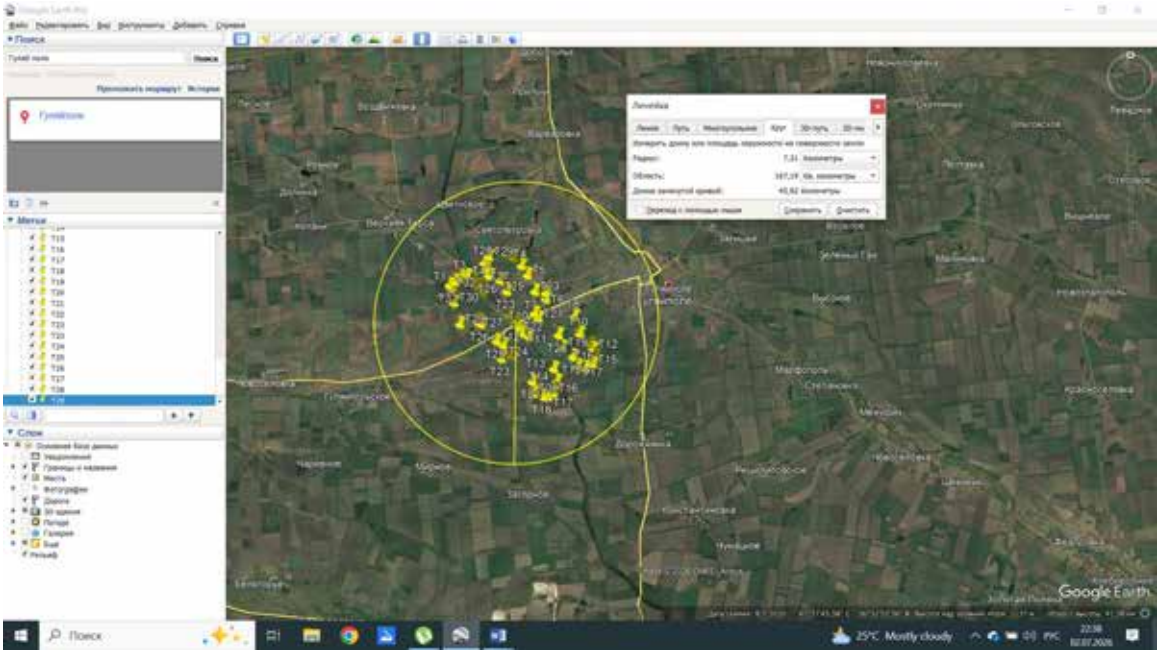


Рис. 3. Зона депресії майбутнього кар'єру до 400 м відпрацювання (основа - наведені координати Західного і Східного покладів), R-7.3км

Таблиця 3

Оцінка зниження рівня основного полтавсько–харківського безнапірного водоносного горизонту

Зниження рівня (S), м	Орієнтовний (R), км	Площа зони впливу, км²
10	0,32	0,33
20	0,65	1,31
30	0,97	2,95
35	1,13	4,02

із фактичними даними експлуатації залізорудного кар'єру Хоуп-Даунс-Норт свідчить про співмірність масштабів гідрогеологічного впливу. Отриманий результат підтверджує реалістичність попередньої оцінки.

Особливо важливим питанням в дослідженнях є питання зміни напряму поверхневого та підземного стоку. Гідрографічна мережа території належить до басейну р. Дніпра. У районі родовища виділяються річки Конка, Жеребець, Гайчур і Верхня Терса. Безпосередньо в межах родовища постійні річки відсутні, а поверхневий стік формується переважно ярково-балковою мережею. У межах родовища присутні балки Гончариха, Солона, Різана, Попова, Шестипол'є та Кучерявська.

Морфометричне моделювання рельєфу показало, що до початку відкритої розробки (рис. 4, а) природний поверхневий стік спрямований у бік яружно-балкової мережі. Зокрема, потоки спрямовуються до балок Гончариха, Різана, Шестипол'є, Солона, Попова та Кучерявська.

Формування глибокої відкритої гірничої виробки принципово змінює морфологію рельєфу. Кар'єр стає новим локальним елементом рельєфу з абсолютними відмітками значно нижчими від прилеглої поверхні. Внаслідок цього змінюється напрям гідравлічного градієнта (рис. 4, б). За результатами наявного 3D-моделювання, при відкритій розробці потоки поверхневого стоку переорієнтовуються у бік кар'єрного простору. Цей процес має принципове природоохоронне значення. Кар'єр у такій ситуації фактично перетворюється на штучну область розвантаження поверхневого і підземного стоку. З одного боку, це забезпечує відведення води від робочої зони. З іншого – концентрація стоку збільшує обсяг води, який необхідно відводити з кар'єру, та підсилює залежність гірничого підприємства від системи водовідливу.

Особливо важливим є взаємозв'язок поверхневого і підземного стоку. За наявності гідравлічного зв'язку між водоносними горизонтами зниження рівня в одному горизонті може викликати перерозподіл потоків у суміжних горизонтах. Саме така ситуація можлива для полтавсько-харківського горизонту, який має гідравлічний зв'язок із нижчими водоносними комплексами.

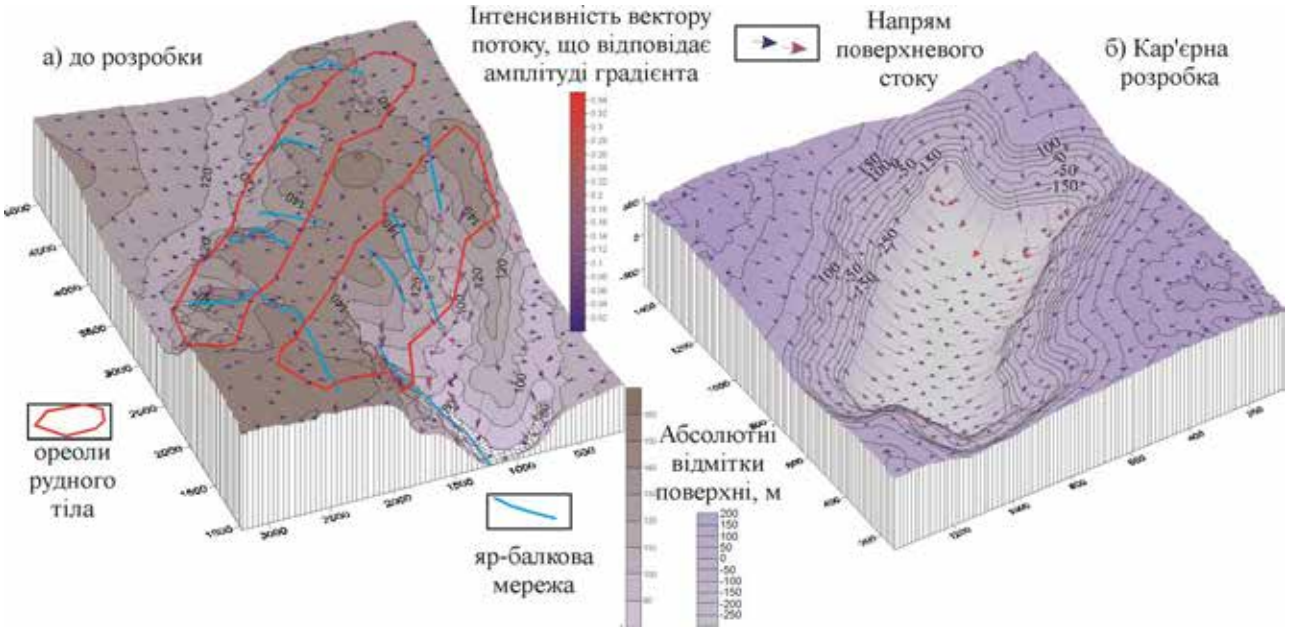


Рис. 4. Результат морфометричного моделювання рельєфу до початку відкритої розробки (а) та після формування глибокої відкритої гірничої виробки (б) з деталізацією напрямів гідравлічного градієнта (напрям поверхневого стоку)

Висновки. ГПР ЗК характеризується складними гідрогеологічними умовами, зумовленими наявністю декількох водоносних горизонтів і комплексів, різними фільтраційними властивостями порід та гідравлічним зв'язком між окремими водоносними системами. У межах родовища виділено сім основних водоносних горизонтів, серед яких найбільше значення для формування водоприпливу до кар'єру мають полтавсько-харківський горизонт, водоносні утворення кори вивітрювання та тріщинні води докембрійських кристалічних порід. Встановлено, що глибина кар'єру 400 м не може безпосередньо ототожнюватися з величиною зниження рівня підземних вод. Для основного полтавсько-харківського безнапірного горизонту, середня потужність якого прийнята на рівні близько 35 м, фізично обгрунтованим є розгляд величини зниження рівня в межах потужності водоносного горизонту. Такий підхід дозволяє уникнути завищення розрахункового масштабу депресійної лійки. За прийнятих середніх параметрів полтавсько-харківського горизонту попередня аналітична оцінка показала, що при зниженні рівня підземних вод на 10–35 м орієнтовний радіус локальної депресійної області становить близько 0,32–1,13 км, а її площа – приблизно 0,33–4,02 км². Отримані значення характеризують окремий водоносний горизонт і не можуть автоматично переноситися на всю багатопластову гідрогеологічну систему родовища. Встановлено, що попередня оцінка радіуса депресійної лійки 13,2 км, отримана при формальному прирівнюванні глибини кар'єру 400 м до величини зниження рівня підземних вод, не повинна використовуватися як достовірне прогнозне значення. Вона може бути наведена лише як демонстрація результату спрощеного сценарію. З урахуванням багатошарової будови водоносної системи та можливого гідравлічного зв'язку між полтавсько-харківським горизонтом, водами кори вивітрювання і тріщинними водами докембрійських порід реальна зона гідрогеологічного впливу може бути більшою за розраховану для одного водоносного горизонту. Тому остаточне визначення просторових меж депресійної лійки потребує побудови багатошарової чисельної моделі фільтрації з урахуванням просторової неоднорідності коефіцієнта фільтрації, водопровідності, гідравлічних зв'язків та умов живлення. Прогнозований водоприплив до кар'єру є суттєвим і може досягати порядку 1500 м³/год, що обумовлює необхідність проектування ефективної системи дренажу та водовідливу. При цьому водоприплив має розглядатися як змінний у часі параметр, залежний від глибини гірничих робіт, розкриття нових водоносних інтервалів, сезонного живлення та фільтраційних властивостей порід.

Аналіз рельєфу показав, що до початку відкритої розробки поверхневий стік території формується переважно в межах яружно-балкової мережі. Формування глибокої кар'єрної виїмки створить нову локальну негативну форму рельєфу та може спричиняти концентрацію поверхневого стоку в напрямку гірничої виробки. Встановлено, що гідрологічний і гідрогеологічний вплив кар'єру необхідно оцінювати комплексно. Зниження рівнів підземних вод може змінювати фільтраційні градієнти

та перерозподіляти потоки між взаємопов'язаними водоносними горизонтами, тоді як зміна рельєфу може переорієнтовувати поверхневий стік. Таким чином, формування кар'єру потенційно впливає одночасно на поверхневий і підземний компоненти водного балансу. Глибину 400 м доцільно розглядати як досліджувану та потенційно прийнятну межу відкритої розробки, за якої подальше поглиблення потребує додаткового гідрогеологічного, техніко-економічного та екологічного обґрунтування.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані для гідрогеоекологічного обґрунтування параметрів відкритої розробки ГПР, зокрема для оцінювання водоприпливу, просторового розвитку депресійної лійки та зміни напрямів поверхневого і підземного стоку. Практичне застосування результатів полягає у виборі та обґрунтуванні раціональних параметрів гірничих робіт, проектуванні системи водовідливу й гідрогеологічного моніторингу.

Література

1. Улицький О. А. Д'яченко Н. О. Касьяненко Д. Л. Визначення впливу ймовірного технологічного чинника видобування залізорудних покладів на зміни екологогідрогеологічного середовища. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля,* № 6,2024. – С. 38-49. https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-05.
2. Motyka J., d'Obyrn K. The radius of influence of mine drainage – Definitions, methods of determination, and practical issues. *Journal of Hydrology,* V. 613, Part A, 2022. – 128422, 10.1016/j.jhydrol.2022.128422.
3. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Касьяненко Д.Л. Збалансований підхід до видобутку залізних руд Гуляйпільського родовища в сучасних умовах. Екологічні науки, 2023. - 5(50). – С. 54-60. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.8.
4. Улицький О. А., Д'яченко Н. О., Савлучинський О. М., Гайовий О. В. Оцінка потенційного впливу промислового видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища на довкілля. *Гірнича геологія та геоекологія*, № 2, 2021. - С. 42-63.
5. Malieiev Ye.V., Levchenko K.S. Research of the impact of open-pit mining on the land and water resources in Kryvbas. *Геотехнічна механіка*. №. 162, 2022. – С. 135–143. https://doi.org/10.15407/geotm2022.162.135.
6. Швагер Н. Ю., Нестеренко, О. В. Вплив гідрогеології, водовідливу та осушення на стійкість порід, деградацію земель і рельєф Кривбасу. *Проблеми охорони праці в Україні*, 41 (3-4), 2025. – С. 31–36. https://doi.org/10.36804/nndipbop.41-3-4.2025.31-36.
7. Bozan, C., Wallis, I., Cook, P. G., & Dogramaci, S. Groundwater-level recovery following closure of open-pit mines. *Hydrogeology Journal*, 30(6), 2022. – P. 1819–1832. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02508-2.
8. Cook P.G., Dogramaci S, McCallum J, Hedley J. Groundwater age, mixing and flow rates in the vicinity of large open pit mines, Pilbara region, northwestern Australia. *Hydrogeol*, 25(1), 2017. – P. 39–53. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1467-y.
9. Cook P.G, Dogramaci S. Estimating recharge from recirculated groundwater with dissolved gases: an end-member mixing analysis. *Water Resources Research*, 55 (7), 2019. – P. 5468–5486. https://doi.org/10.1029/2019WR025012

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026