

## РОЗРОБКА ІНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРІЮ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЗБАЛАНСОВАНOSTІ ТЕРИТОРІЇ ДЛЯ КАР'ЄРНОЇ ТА ЗМІШАНОЇ СИСТЕМ РОЗРОБКИ (НА ПРИКЛАДІ ГУЛЯЙПІЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА)

Касьяненко Д.Л.<sup>1</sup>, Улицький О.А.<sup>2</sup>, Дяченко Н.О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

<sup>2</sup> ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»  
пр. Академіка Палладіна, 34А, 03142, Київ

<sup>3</sup> ДУ «Науковий центр гірничої геології, геоекології та розвитку інфраструктури НАН України»  
бульв. Академіка Вернадського 34Б, 03142, м. Київ

[law@kasyanenko.com.ua](mailto:law@kasyanenko.com.ua), [olegulytsky@gmail.com](mailto:olegulytsky@gmail.com), [natalidyachenko1969@gmail.com](mailto:natalidyachenko1969@gmail.com)

Вивчено геометрію відкритих гірничих виробок під час розрахунку габаритів кар'єру у плані з урахуванням глибини та кута укосу бортів кар'єру, розроблено інтегральний критерій екологічної збалансованості території ( $I_{ЕС}$ ) для оцінки кар'єрної та змішаної систем розробки родовищ корисних копалин на прикладі Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів. Інтегральна оцінка в дослідженнях – це сумарний поширений індекс, що пов'язує екологічні показники стану довкілля, техногенні параметри виробничої діяльності та технологічні характеристики способу розробки. Обґрунтовано необхідність переходу від окремих екологічних показників до узагальненого інтегрального індексу, який враховує геоморфологічні, гідрогеологічні, геохімічні та техногенні параметри. Запропоновано адитивну модель інтегрального критерію з нормуванням показників методом min–max та визначенням ваг методом попарних порівнянь. У праці проаналізовані концептуальні відмінності технологічних систем видобутку корисних копалин, означено формалізовану математичну модель порівняння двох сценаріїв освоєння родовища: повністю кар'єрного (до 600 м) та комбінованого (кар'єр до 400 м із подальшим переходом на підземну розробку). Вперше до умов досліджуваного родовища запропоновано екологічний коефіцієнт економії (Кесо), що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри впливу. Для коректної оцінки екологічних наслідків видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища емпірично обґрунтовано екологічну доцільність комбінованого способу розробки. Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри. Зазначено, що змішана система розробки забезпечує зменшення сукупного екологічного навантаження на близько 50% порівняно з повною кар'єрною схемою, а значення  $I_{ЕС}$  переходить у межі екологічно допустимого рівня. *Ключові слова:* інтегральний критерій, Гуляйпільське родовище, екологічний коефіцієнт економії, сценарії освоєння, змішана система розробки.

### Development of an integral criterion of ecological balance of the territory for quarry and mixed development systems (on the example of the Gulyaipil deposit). Kasyanenko D. Ulytskyi O. Dyachenko N.

The geometry of open pit mines was studied when calculating the dimensions of the quarry in the plan, taking into account the depth and angle of slope of the sides of the quarry, and an integral criterion of ecological balance of the territory (IES) was developed for the assessment of quarry and mixed systems of development of mineral deposits using the example of the Gulyaipil iron quartzite deposit. Integral assessment in research – is a combined common index linking environmental indicators of the state of the environment, man-made parameters of production activity and technological characteristics of the method of development. The need to move from individual ecological indicators to a generalized integral index, which takes into account geomorphological, hydrogeological, geochemical and man-made parameters, is substantiated. An additive model of the integral criterion with normalization of indicators by the min–max method and determination of weights by the method of pairwise comparisons is proposed. The work analyzes the conceptual differences of technological systems of mineral extraction, defines a formalized mathematical model for comparing two scenarios of deposit development: fully quarried (up to 600 m) and combined (quarry up to 400 m with subsequent transition to underground development). For the first time, an ecological saving factor (Keco) integrating planar, volumetric and hydrogeological impact parameters was proposed to the conditions of the studied deposit. For the correct assessment of the ecological consequences of the extraction of ferruginous quartzites of the Gulyaipil deposit, the ecological expediency of the combined method of development is empirically substantiated. An ecological saving factor integrating planar, volumetric and hydrogeological parameters is proposed. It is noted that the mixed development system provides a reduction of the aggregate environmental load by about 50% compared to the full career scheme, and the value of the IES goes beyond the environmentally acceptable level. *Key words:* integral criterion, Gulyaipil deposit, ecological coefficient of economy, development scenarios, mixed system



**Вступ.** Здійснені дослідження щодо інтегральної оцінки екологічних наслідків гірничої діяльності, порівняння технологій розробки та побудови екологічних індексів, а також короткі узагальнення їх методів і висновків [1-3], в яких автори порівнюють екологічні наслідки кар'єрної (відкритої) та підземної розробок корисних копалин за низкою параметрів; оцінюють комбіновані технології розробки, що можуть зменшити сумарний екологічний вплив на довкілля за належного вибору граничних глибин. На основі проведеного факторного аналізу розраховані інтегральні індекси складових управління екологічною безпекою засвідчили, що змішана технологія істотно впливає на зниження площинного та екологічного ризиків. При правильному технічному обґрунтуванні комбінована схема може бути оптимальним варіантом для середньо- та глибоких покладів, підтверджуючи практичну ефективність методології інтегральних індикаторів, що дозволяють простежити зміну рівня економіко-екологічної безпеки ПРАТ «Північний ГЗК», ПРАТ «Центральний ГЗК» та ПРАТ «Інгулецький ГЗК».

Сучасні виклики у вирішенні питання видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища полягає у формуванні такої технологічної схеми освоєння надр, що забезпечить мінімізацію трансформації природних геосистем, раціональне використання водних ресурсів та зниження площі техногенного порушення території. Вибір способу розробки (відкритий, підземний або комбінований) безпосередньо визначає масштаби ландшафтних змін, гідрогеологічні наслідки та інтенсивність антропогенного навантаження.

Система показників екологічної рівноваги для Гуляйпільського родовища має базуватися на геометричних параметрах кінцевого контуру кар'єру; балансі підземних вод і коефіцієнті їх повторного використання; обсягах розкриття та техногенного навантаження і можливості поетапного переходу до підземної стадії. Але обґрунтування екологічної рівноваги території під час розробки залізистих кварцитів не може обмежуватися лише геометрією кар'єру та гідрогеологічними параметрами.

Екологічна рівновага гірничопромислової території формується як інтегрований результат взаємодії геометричних параметрів розробки, тектонічної структури масиву та геохімічної активності порід, а врахування цих чинників у виборі технології видобутку забезпечує підвищення інтегрального показника екологічної збалансованості на етапах експлуатації та рекультиватії.

Саме тому **мета праці** - розробити та апробувати інтегральний критерій екологічної збалансованості території для порівняльної оцінки кар'єрної та змішаної систем розробок залізистих кварцитів і кількісно обґрунтувати екологічну доцільність комбінованої технологічної схеми для Гуляйпільського родовища.

**Об'єкт дослідження** - гірничопромислова територія в межах Гуляйпільського родовища за різних технологічних схем освоєння надр.

**Предмет дослідження** - особливості формування екологічної збалансованості території під впливом геометричних параметрів кар'єру, обсягів розкривних робіт, змін гідрогеологічного режиму та інших техногенно зумовлених факторів при кар'єрній і змішаній системах розробки.

**Методи дослідження.** Методи дослідження: 1. Математичні - розрахунок площинних та об'ємних показників техногенного впливу; оцінка гідрогеологічного впливу на основі залежності радіуса депресійної лійки від глибини розробки; нормування показників методом min-max; визначення вагових коефіцієнтів методом попарних порівнянь (експертна оцінка); розрахунок інтегрального критерію екологічної збалансованості території ( $I_{ES}$ ) та розрахунок екологічного коефіцієнта економії ( $K_{eco}$ ). 2. Аналітичні - порівняльна оцінка кар'єрної та змішаної систем розробки та формалізація екологічної доцільності комбінованої технологічної схеми розробки корисних копалин.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Для оцінки екологічної збалансованості території необхідним є показник який показує наскільки територія є екологічно збалансованою або дестабілізованою. Таким показником може бути інтегральний критерій екологічної збалансованості території ( $I_{ES}$ ) для кар'єрної, шахтної та змішаної систем розробки (в залежності від технології розробки корисної копалини).

Власне інтегральний критерій – це узагальнений кількісний показник, що об'єднує декілька екологічних параметрів у єдину оцінку стану території. Тобто замість окремих категорій: концентрації забруднювачів, рівня підземних вод, площі деградованих земель, інтенсивності ерозії, втрати біорізноманіття, тектонічно-гідрогеохімічне різноманіття ми формуємо єдиний показник, який відображає наскільки територія є екологічно збалансованою або дестабілізованою.

Система розробки родовища (кар'єр, шахта чи змішана схема) має фундаментальний вплив на формування рівня екологічного стану гірничопромислової території. Він мультикомпонентний та охоплює площу просторового порушення; трансформацію гідрогеологічного режиму; геохімічні зміни середовища; біотичну відновлюваність; динаміку геомеханічної стабільності.

Інтегральний критерій екологічної збалансованості  $I_{ES}$  в нашому випадку має охоплювати кожну з цих складових у системі показників і дозволяти робити порівняння технологічних схем у єдиному вимірі. Одразу визначимося, що не оцінюватимемо біотичну відновлюваність, бо ж за відсутності моніторингових спостережень за змінами цього показника такі родовища ще не розроблялися.

Інтегральна оцінка в дослідженнях передбачає сумарний поширений індекс, що пов'язує екологічні показники стану довкілля, техногенні параметри виробничої діяльності та технологічні характеристики способу розробки. Класичні підходи комплексних індексних систем в різних сферах діяльності були використані в численних дослідженнях [4]. В роботі [5] визначено, що індексні методи в цілому – це розрахункові, кількісні методи, пов'язані з визначенням одиничних індексів (коефіцієнтів) за ключовими показниками й аспектами діяльності та їх зведенням до інтегрального показника. Залежно від методики аналізу застосування цих методів можна передбачати як проведення досить складних розрахунків, так і простих математичних операцій. В той же час, інтегральний метод дозволяє отримати однозначні оцінки позицій; є досить простим і наочним, але не дає можливості для глибокого аналізу. Складні системи часто передбачають розбиття індивідуальних індикаторів на підгрупи для точнішого аналізу.

Базою для розробки показника інтегральної оцінки виступають екологічні показники, розроблені Європейською Економічною Комісією ООН «Керівництво щодо застосування екологічних показників у країнах Східної Європи, Кавказу та Центральної Азії», «Директива Європейського парламенту та Ради Європейського Союзу № 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 року» (Водна рамкова директива ЄС) [6, 7], та положення чинного законодавства, нормативно-правових документів стосовно створення Державної системи моніторингу довкілля і затверджених порядків та положень щодо його проведення.

Основні підходи до інтегральної оцінки можуть включати різні коефіцієнти, наприклад коефіцієнт екологічної стабільності [8]:

$$E_{кс} = \frac{\sum P_i B_i}{\sum P_i}$$

де:  $P_i$  – площа,  $B_i$  – бал стабільності.

Це може бути інтегральний показник стану довкілля (Ппідс):

$$Ппідс = \frac{P_{вод} + P_{зем} + P_{атм}}{3},$$

де:  $P$  – індекси стану води, землі та атмосфери.

Як правило, інтегральний критерій для оцінки екологічної збалансованості території розглядають як адитивну модель з окремими складовими (в загальному вигляді):

$$I_{ES} = \omega_1 G + \omega_2 H + \omega_3 T + \omega_4 K_{tect} + \omega_5 K_{geo} \quad (1)$$

де:  $G$  – геоморфологічна стабільність;  $H$  – гідрогеологічна стабільність;  $T$  – техногенне навантаження;  $K_{tect}$  – тектонічний параметр порушеності;  $K_{geo}$  – геохімічний стабілізуючий показник;  $\omega_i$  – це вага показника  $i$ , яка визначає ступінь впливу цього показника на інтегральний результат.

Такий критерій розширює класичні підходи шляхом включення структурно-тектонічної та геохімічної компонент.

Методика нормування показників полягає в наступному. Щоб уникнути неоднорідності одиниць виміру, кожний показник нормується у діапазоні  $[0; 1]$  за методом стимулюючих (чим більше – тим краще) та дестимулюючих (чим менше – тим краще) показників:

Стимулюючі показники:

$$x_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Дестимулюючі показники:

$$x_i = 1 - \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

де:  $X_{(max - min)}$  – показник площі порушень або засолення та ін.

Це стандартний підхід, що використовується в індексі екологічної ефективності (EPI - Environmental Performance Index) та багатьох міжнародних шкалах оцінки екологічних ризиків. Це метод кількісної оцінки та рейтингу, що базується на більш ніж 20 показниках, які вимірюють екологічний стан та ефективність державної екологічної політики країн світу. Його розробили фахівці Єльського та Колумбійського університетів для оцінки здоров'я екосистем та кліматичної політики. Індекс публікується 1 раз на 2 роки [9].

Ваги  $\omega_i$  визначаються методом попарних порівнянь, узгодженим із групою експертів з екології, гірничих технологій та гідрогеології.

Аналіз численних досліджень, у яких порівнюються технологічні впливи на екологію у відкритих та підземних розробках, засвідчив [2, 10], що існують концептуальні відмінності технологічних систем видобування корисних копалин. Результати показують, що відкрита розробка родовищ має більш видимі наслідки (деградація ґрунтів і повітря), тоді як підземна розробка родовищ створює приховані, але більш токсичні наслідки (забруднення води та професійні ризики) (табл. 1).

Тому дослідження родовища має окремі особливості: передбачена розробка - кар'єр; пропонується технологія - змішана розробка (кар'єр до 400-500 м + шахта глибше). Морфометричні зміни поверхні рельєфу великі за рахунок контурів кар'єру (значно більший за рудні тіла). Структурно-тектонічні зони не чітко означені, але вплив гідродинаміки доволі значущий. В цьому випадку, домінуючою складовою буде комбінація великих морфометричних змін та геохімічних і гідрогеологічних ефектів. Змішана схема дозволить мінімізувати площу поверхневого порушення.

Для коректної оцінки екологічних наслідків розробки корисних копалин необхідне емпіричне обґрунтування екологічної доцільності комбінова-

Таблиця 1

## Концептуальні відмінності технологічних систем

Компонент критерію	Кар'єрна схема	Шахтна схема	Змішана схема
Площа поверхневого порушення	Найбільша	Мінімальна	Помірна
Зміна гідрогеології	Висока (велика депресійна лійка)	Специфічна, локальна депресійна лійка	Помірна депресійна лійка
Ризик геохімічної мобілізації	Високий	Середній (локальний)	Середній
Тектонічні ризики	Менш критичні	Найбільш значущі	Значущі
Економічна ефективність	Висока для неглибоких покладів	Вища при глибоких покладах	Оптимальна

Таблиця 2.

## Вихідні параметри (Гуляйпільське родовище)

Вихідні параметри	Показники
Площа родовища	936 га
Протяжність пласта	17 км
Глибина оцінки запасів	600 м
Середня потужність розкриву	120 м
Коефіцієнт розкриву	1,1 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Прогнозна глибина кар'єру (сценарій 1)	600 м
Комбінований варіант (сценарій 2)	до 400 м – кар'єр, 400+ м – підземна розробка

ного способу розробки для та Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів.

## Математична модель порівняння технологій розробки.

В дослідженні розроблено формалізований розрахунок - математична модель порівняння двох сценаріїв розробки та інтеграцію в інтегральний критерій екологічної збалансованості для Гуляйпільського родовища. Сценарій 1 – кар'єр до глибини 600 м. Сценарій 2 – комбінований варіант: до 400 м – кар'єр, 400+ м – підземна розробка (табл. 2).

Сценарій 1 – повністю кар'єрна розробка до 600 м

Із геометрії відкритих гірничих виробок при розрахунку габаритів кар'єру у плані з урахуванням глибини та кута укосу бортів використовуються параметри кар'єру, які визначаються:

$$L_d = L_{dp} + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma$$

$$B_p = B_d + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma$$

де:  $L_d$  – довжина кар'єру по дну,  $L_{dp}$  – довжина кар'єру по поверхні (або навпаки – залежить від прийнятої схеми),  $B_p$  – ширина по поверхні,  $B_d$  – ширина по дну,  $H_k$  – глибина кар'єру,  $\gamma$  – кут укосу борту кар'єру.

$H_k = 600$  м, середній кут укосу для міцних порід при глибині  $>300$  м:  $\gamma \approx 45^\circ \rightarrow \operatorname{ctg} 45^\circ = 1$

Розрахунок збільшення габаритів:

$$\Delta L = 2 \times 600 \times 1 = 1200 \text{ м}$$

$$\Delta B = 2 \times 600 \times 1 = 1200 \text{ м}$$

Площа додаткового розширення:

$$\Delta S_1 \approx 1.2 \times 1.2 = 1.44 \text{ км}^2 = 144 \text{ га}$$

Сценарій 2 – комбінована схема (кар'єр до 400 м)

$$\Delta L = 2 \times 400 \times 1 = 800 \text{ м}$$

$$\Delta B = 2 \times 400 \times 1 = 800 \text{ м}$$

$$\Delta S_2 \approx 0.8 \times 0.8 = 0.64 \text{ км}^2 = 64 \text{ га}$$

Екологічний коефіцієнт економії площі буде мати наступний вигляд:

$$K_s = \frac{S_1 - S_2}{S_1}$$

$$K_s = \frac{144 - 64}{144} = 0.56$$

Тобто, зменшення площі порушених земель складе 56% в умовах 2 варіанту.

Розрахунок економії розкривних робіт залежить від об'єму розкриву, а саме:

$$V = S \times H_{cp}$$

де:  $H_{cp}$  – середня глибина розкриву,  $S$  – площа розкриву,  $V$  – об'єм розкриву.

Для спрощення беремо середню глибину для двох сценаріїв та розраховуємо об'єми розкриву (табл. 3.3.).

Екологічний коефіцієнт економії розкриву буде мати наступний вигляд:

## Об'єми розкриття для двох сценаріїв

Сценарій 1:	Сценарій 2:
Глибина 600 м	Глибина 400 м
$V_1=144\text{га}\times 600\text{м}\approx 86.4\text{млнм}^3$	$V_2=64\text{га}\times 400\text{м}\approx 25.6\text{млнм}^3$

$$K_v = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

$$K_s = \frac{86.4 - 25.6}{86.4} = 0.70$$

Тобто, економія розкриття складає 70% в сценарії 2 відносно сценарію 1.

Оцінка зниження впливу на гідрогеологічний режим.

Радіус депресійної лійки (R) приблизно пропорційний глибині (H), тобто:

$$R \sim \sqrt{H}$$

$$R_1 \sim \sqrt{600} = 24.5 \text{ м (сценарій 1)}$$

$$R_2 \sim \sqrt{400} = 20 \text{ м (сценарій 2)}$$

Тоді екологічний коефіцієнт економії радіусу депресійної лійки має вигляд:

$$K_R = \frac{R_1 - R_2}{R_1}$$

$$K_R = \frac{24.5 - 20}{24.5} = 0.18$$

За іншим сценарієм маємо зменшення радіуса впливу на 18–20%.

Формування інтегрального екологічного коефіцієнта економії  $K_{ес}$ .

У реальних системах оцінювання всі показники мають різну значимість. Наприклад, деградація ґрунту може мати менший вплив на екологічну стабільність, ніж кількість важких металів у водах. Або у водних екосистемах якість води може важити більше, ніж морфологічна стабільність схилів. Тому ваги (вагові коефіцієнти) дозволяють: відобразити експертну або нормативну значимість показника; інтегрувати різноманітні дані у єдину оцінку; уникнути ситуації, коли велике значення маловажливого показника «врівноважується» малим значенням важливішого показника [11].

Саме тому, припустимо введення вагових коефіцієнтів, які показують наскільки важливий кожен показник у загальній оцінці екологічного стану; як зміна одного показника впливає на інтегральний показник; що деякі показники можуть бути більш значущими (наприклад, забруднення води) порівняно з іншими (наприклад пилом). Наприклад:

1. площа порушення – 0.4
2. розкриття – 0.3

3. гідрогеологія – 0.2

4. викиди/пил – 0.1

Фактично, це стандартний елемент багатокритеріальної оцінки. Вагові коефіцієнти у формулі інтегрального показника були отримані методом попарних порівнянь (МПП) на основі експертних оцінок фахівців у галузі гірничої екології. Це дозволяє врахувати різну значущість окремих компонентів екологічного стану у загальному інтегральному критерії. У гірничо-екологічних системах якість води та гідрогеологічний стан критично впливають на екосистему, тоді як деякі морфологічні параметри можуть бути менш визначальними. Тому застосування методів МПП або експертних оцінок є більш обґрунтованим [12].

$$K_{ес} = 0.4K_s + 0.3K_v + 0.2K_R + 0.1K_E$$

Приймаємо середнє зниження пилу 30%, тобто  $K_E = 0.3$ , тоді :

$$K_{ес} = 0.4 \times 0.56 + 0.3 \times 0.70 + 0.2 \times 0.18 + 0.1 \times 0.30 = 0.50$$

Екологічний коефіцієнт економії становить  $K_{ес} = 0.50$ . Отже, комбінована система зменшує сукупне екологічне навантаження приблизно на 50% порівняно з повністю кар'єрною схемою.

Наступний етап – це інтеграція в інтегральний критерій екологічної збалансованості. У роботі модель адаптована до умов гірничопромислових геосистем.

Базовий інтегральний критерій  $I_{ES}$  з класу адитивних інтегральних індексів з нормуванням відносно порогових (критичних) значень має такий вигляд:

$$I_{ES} = \sum \omega_i \frac{X_i}{X_{crit}}$$

де:  $X_i$  – фактичне значення;  $X_{crit}$  – гранично допустиме або цільове значення;  $\omega_i$  – це вага показника  $i$ , яка визначає ступінь впливу цього показника на інтегральний результат.

Нормування виконано методом min–max. Це стандартна форма побудови інтегральних показників в екологічній безпеці, сталому розвитку, техногенно-екологічному ризику, гео-екологічній оцінці територій. Такий підхід широко використовується в екологічних індексах якості води (WQI), індексах техногенного навантаження, системах екологічного моніторингу. Пороговий підхід або використання  $X_{crit}$  дозволяє врахувати екологічні нормативи (ГДК, допустимі деформації тощо) та визначити межу переходу системи в нестійкий стан.

До критерію можуть додаватися такі показники:

1. Гідрогеологічний блок - коефіцієнт зміни рівня підземних вод, мінералізація.

2. Геоморфологічний блок - коефіцієнт техногенної трансформації рельєфу, індекс ерозійної небезпеки.

3. Ґрунтовий блок - коефіцієнт деградації ґрунтів, рівень важких металів.

4. Біотичний блок - індекс біорізноманіття, площа порушених екосистем.

Тобто, ця система оцінки інтегрує різні екологічні параметри.

Для двох сценаріїв  $I_{ES(1)}$  та  $I_{ES(2)}$  маємо наступні показники:

$$\begin{aligned} I_{ES(1)} &> 1 \\ I_{ES(2)} &\approx 0.5-0.7 \end{aligned}$$

де  $I_{ES} < 0,7$  – екологічно допустимий рівень.

**Висновки.** Вперше для умов Гуляйпільського родовища розроблено та розраховано інтегральний критерій для оцінки екологічної збалансованості території, розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності комбінованої системи розробки.

Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри.

4. Доведено, що перехід на змішану систему дозволяє зменшити сукупне екологічне навантаження на 50%. Варто зауважити, що інтегральний критерій дозволив кількісно оцінити екологічну ефективність технологічних схем 1 і 2, засвідчивши, що перехід до змішаної системи розробки (другий сценарій) підвищує екологічну збалансованість території.

### Література

- Emekwisia, C.C., Ogunsiji, T.O., Bauna, F.K., Otsabomhe, G.O., Akinbamilowo, O.O., Olagunju, A.R., Akagu, E.E. Comparative Analysis of Environmental Impacts Associated with Surface and Underground Mining Operations. *South Asian Research Journal of Engineering and Technology*, 7(4), 2025. С. 121–125. URL: <https://doi.org/10.36346/sarjet.2025.v07i04.005>.
- Stupnik M., Kalinichenko V., Kalinichenko O., Shepel O., Pochtarev A. Improvement of the transitional technology from open pit to underground mining of magnetite quartzite. *E3S Web of Conferences* 526, 2024 - 01026. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601026>.
- Амбер А. Інтегральна оцінка управління економіко-екологічною безпекою підприємств України. *Економічний простір*, № 204, 2025. - С. 17-23. URL: <https://doi.org/10.30838/EP.204.17-23>.
- Сгоров І. Комплексні індикатори у соціально-економічних дослідженнях: переваги і недоліки. *Університетські наукові записки*, № 1-2 (85-86), 2022. - С. 195-205. URL: <https://doi.org/10.37491/UNZ.85-86.16>.
- Кваско, А.В. Аналіз методів оцінки конкурентоспроможності підприємства. *Наукові записки /Української академії друкарства/*, № 1(54), 2017. С. 111–118. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23737>.
- КМУ Розпорядження «Про схвалення Концепції створення загальнодержавної автоматизованої системи «Відкрити довкілля» від 7.11.2018 р. № 825-р. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/825-2018-%D1%80/en/ed20181107#Text>.
- Директива Європейського Парламенту і Ради 2000/60/ЄС від 23.10.2000 р. «Про встановлення рамок заходів Співтовариства в галузі водної політики». Документ 994\_962./Редакція від 20.11.2014/. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_962#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text).
- Попова В.І. Екодіагностика природно-господарської організації України: агроландшафтний аспект. *Економіка і прогнозування*. № 3, 2012. - С. 92-101.9. Hsu, A., L.A. Johnson, and A. Lloyd. Measuring Progress: *A Practical Guide from the Developers of the Environmental Performance Index (EPI)*. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2013. – 80 p. URL: [http://www.epi.yale.edu/sites/default/files/downloads/YCELP\\_Measuring\\_Progress\\_Manual.pdf](http://www.epi.yale.edu/sites/default/files/downloads/YCELP_Measuring_Progress_Manual.pdf).
- Emekwisia, Chukwudubem C., Ogunsiji, Taiwo O., Bauna, Faith K., Otsabomhe, Godfrey O., Akinbamilowo, Oladimeji O., Olagunju, Adewale R., Akagu, Emmanuel E. Comparative Analysis of Environmental Impacts Associated with Surface and Underground Mining Operations. *South Asian Res J Eng Tech*, 7(4), 2025. - 121-125 c. <https://doi.org/10.36346/sarjet.2025.v07i04.005>.
- Alina Kabata-Pendias. *Trace Elements in Soils and Plants*, Third Edition 3rd Edition. CRC Press, 2000. - 331 p. URL: <https://dl.icdst.org/pdfs/files3/284d873749e377558208bca765468ffd.pdf>.
- Atul Singh, Siddhartha Agarwal, Aniket Prabhat. A multi-criteria decision framework to evaluate sustainable alternatives for repurposing of abandoned or closed surface coal mines. *Frontiers in Earth Science*, V. 12, 2024. – 14 p.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026