

© О.В. Ложніков<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВІДПРАЦЮВАННЯ ОБВОДНЕНИХ ТИТАН- ЦИРКОНІЄВИХ РОДОВИЩ

© O. Lozhnikov<sup>1</sup><sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## METHODOLOGICAL BASE OF RECOURSE-SAVING TECHNOLOGY EVALUATION AT THE SURFACE MINING OF FLOODED TITANIUM ZIRCONIUM DEPOSITS

**Мета.** Розробка методологічних принципів вибору ефективної технологічної схеми відпрацювання обводнених титан-цирконієвих родовищ з урахуванням економічних, технічних і природоохоронних чинників.

**Методика дослідження.** Аналітичний метод досліджень застосовувався при аналізі факторів, що впливають на вибір критеріїв для оцінки ефективності технологічних схем розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ. Метод техніко-економічного аналізу використовувався при розробці рекомендацій щодо оцінки економічних критеріїв для різних технологічних схем, які можуть застосовуватися в умовах розробки обводненого кар'єра.

**Результати досліджень.** Встановлено основні 16 критеріїв, які в різній мірі враховуються при виборі технологічної схеми розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ. Виконана експертна оцінка з ранжирування і встановлення важливості кожного з наведених критеріїв. Встановлено, що для оцінки 16 критеріїв згідно з використанням коефіцієнта узгодженості (коефіцієнта конкордації Кендалла) є доцільним залучення 4 експертів в області відкритої розробки родовищ корисних копалин.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано методику визначення оптимальної технологічної схеми розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ шляхом встановлення нормованої важливості оцінки основних 16 критеріїв, які впливають на вибір технологічної схеми і включають: економічні, технологічні та природоохоронні складові. При цьому оцінювання економічних показників кожної схеми пропонується проводити шляхом визначення відсоткової різниці між показниками найкращої схеми з іншими схемами розробки.

**Практичне значення.** Розроблено методологічні основи оцінки ефективності ресурсозберігаючих технологій, які можуть застосовуватися при відпрацюванні обводнених титан-цирконієвих родовищ корисних копалин.

**Ключові слова:** відкрита розробка, методика вибору, кар'єр, обводнені родовища, критерій оцінки, експерт, технологія розробки, нормована важливість, ранжирування

### 1. Постановка проблеми.

Розробка нових родовищ титан-цирконієвої сировини ставить складні завдання перед проектувальниками, оскільки істотно ускладнюються гірничо- і гідрогеологічні умови експлуатації кар'єрів. Основні складності полягають у виборі ефективної технологічної схеми розробки родовища, яка дозволить з мінімальними втратами видобувати рудні піски в обводнених умовах [1, 2].

Найбільш перспективним до освоєння вважається Мотронівсько-Аннівська ділянка Малишевського родовища титан-цирконієвих руд, яка розташована на

Дніпропетровщині. Особливістю даного родовища є нетипове для даної групи родовищ України розміщення водоносного горизонту в породах вище рудного шару. Результатом такого розміщення є постійне потрапляння ґрунтових вод у робочу зону видобувного уступу, через що ускладнюється звичайна робота виймально-навантажувальних машин й автотранспортного комплексу [3].

У цьому зв'язку виникає потреба в обґрунтуванні комплексної оцінки існуючих технологічних схем розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ, яка дозволить урахувати наступні фактори: безпеку ведення робіт, економічну ефективність, мінімальні втрати корисної копалини, комплексне використання супутньої сировини, надійність технології, можливість її застосування за умови обмежених земельних ресурсах.

## **2. Аналіз основних досліджень по темі роботи.**

Питаннями вибору ефективних технологічних схем при розробці родовищ корисних копалин відкритим способом займалося не одне покоління вітчизняних і зарубіжних вчених, при цьому дані питання не зникли з порядку денного. Вони постійно вимагають уточнень і доопрацювань в залежності від типу корисних копалин, які видобуваються законодавчої бази країни, внутрішнього і світового попиту на продукцію гірничодобувних підприємств [4, 5].

Оцінка технологічних параметрів при виборі ефективних технологічних схем детально розглянута в роботах [6, 7]. При цьому в роботах основна увага приділяється, як економічним, так і технічним параметрам, які впливають на рішення про вибір оптимальної технологічної схеми розробки кар'єру. Однак в роботах не враховуються параметри впливу технологічної схеми розробки на селективний видобуток корисних копалин або вплив на навколишнє природне середовище.

У роботах [8, 9] розглянуті методичні основи до вибору технологічних схем розробки металевих руд з урахуванням екологічних факторів. Оцінюється негативний вплив технології розробки металевих корисних копалин на екологічні показники життєдіяльності регіонів. При цьому в роботах не розглянуті інструменти зменшення негативного впливу на навколишнє середовище гірничодобувним підприємством і не розроблені рекомендації щодо ефективного зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище.

## **3. Встановлення невирішених проблем.**

Аналіз існуючих науково-дослідних робіт показує, що при виборі ефективної технологічної схеми відкритої розробки родовищ, за основний критерій приймається показник наведеної собівартості видобування тонни корисної копалини. Найбільш важливим недоліком вибору технологічної схеми за цим принципом є нехтування іншими критеріями, які в певних ситуаціях можуть зіграти вирішальну роль.

Наприклад, технологічна схема, що має найкращі показники собівартості розробки корисної копалини, але в той же час яка має найбільший рівень відходів, розміщення яких фізично неможливе в районі розробки родовища, програє технологічній схемі зі зниженим утворенням відходів, але більш високою собівартістю

видобутку корисної копалини. У цьому зв'язку, актуальною є розробка методологічних основ оцінки технологічних схем відпрацювання обводнених титан-цирконієвих родовищ, які будуть враховувати оптимальну кількість факторів.

**4. Постановка задач.** При розробці методологічних основ вибору оптимальної технологічної схеми відпрацювання обводнених титан-цирконієвих родовищ необхідно вирішити наступні завдання: виконати аналіз критеріїв відпрацювання родовища, які впливають на вибір технологічної схеми; обґрунтувати вплив важливості (ваги) кожного критерію на вибір технологічної схеми; розробити методику визначення нормованої важливості оцінки кожного з розглянутих критеріїв; розробити методику визначення оптимальної технологічної схеми з урахуванням рангу й важливості (ваги) встановлених критеріїв.

**5. Виклад основного матеріалу.** Як відомо із практики відкритих гірничих робіт оцінка технологічних схем розробки родовищ корисних копалин є комплексним завданням, від вірного вирішення якої залежить ефективність подальшої експлуатації кар'єру. Чим більше факторів і критеріїв враховано при рішенні цього завдання, тим більш точний результат можна буде одержати в результаті науково-дослідних і проектних робіт.

Детальний аналіз факторів, що впливають на вибір технологічної схеми розробки обводненого титан-цирконієвої родовища дозволив встановити 16 основних критеріїв, від яких у різній ступені залежить ефективність експлуатації кар'єру. До них безпосередньо відносяться:

1. Безпека технології (рівень безпеки) ( $K_1$ );
2. Вплив виймально-навантажувального устаткування на втрату основної сировини при видобутку ( $K_2$ );
3. Можливість застосування технологічної схеми в обмежених земельних умовах ( $K_3$ );
4. Можливість господарської діяльності на порушених землях внаслідок зменшення площі хвостосховища ( $K_4$ );
5. Витрати на водовідведення (осушення) кар'єру й створення резервуара з технічною водою ( $K_5$ ), грн. /рік;
6. Витрати на видобуток руди з урахуванням землекористування, т/грн. ( $K_6$ );
7. Витрати на видобуток руди з урахуванням розробки супутніх корисних копалин, т/грн. ( $K_7$ );
8. Витрати на видобуток руди, т/грн. ( $K_8$ );
9. Надійність (довговічність) технології ( $K_9$ );
10. Негативний вплив технологічної схеми на навколишнє природне середовище ( $K_{10}$ );
11. Забезпечення ринку супутньою сировиною для будівельної промисловості ( $K_{11}$ );
12. Проектна площа хвостосховища ( $K_{12}$ );
13. Селективне видобування супутніх корисних копалин ( $K_{13}$ );
14. Зменшення площі землі, порушеної кар'єрами будівельних матеріалів за рахунок залучення супутньої сировини титан-цирконієвого родовища ( $K_{14}$ );
15. Рівень утворення відходів ( $K_{15}$ );

## 16. Формування техногенного родовища (K<sub>16</sub>).

При вирішенні першого завдання досліджень, виконано детальний аналіз критеріїв, які впливають на вибір оптимальної технологічної схеми відпрацювання обводнених титан-цирконієвих родовищ. На підставі отриманих результатів досліджень виконується рішення другого завдання з обґрунтування важливості кожного з перелічених факторів на вибір технологічної схеми розробки.

Вибір оптимальної технологічної схеми розробки обводненого титан-цирконієвого родовища повинен здійснюватися шляхом присвоєння кожному із зазначених критеріїв певного рангу й важливості (ваги) для подальшої порівняльної оцінки можливих технологічних схем.

Для вибору оптимальної технологічної схеми проектним і науково-дослідним організаціям запропоновано скористатися розробленою методикою, яка враховує 16 критеріїв, наведених вище. Вага кожного з 16 критеріїв визначається експертами в області відкритої розробки родовищ, число яких попередньо встановлюється на основі коефіцієнта погодженості (коефіцієнта конкордації Кендалла) [10]. З використанням цього коефіцієнта конкордації встановлено, що при кількості оцінюваних критеріїв (об'єктів) від 10 до 20 потрібно від 3 до 5 експертів. Оскільки в нашому випадку кількість оцінюваних об'єктів становить 16, рекомендується задіяти чотирьох експертів для присвоєння кожному з розглянутих критеріїв рангу й важливості. Основними вимогами до експертів є наукова ступінь кандидата (доктора) технічних наук за спеціальністю, пов'язаною з розробкою родовищ корисних копалин або стаж роботи проектувальника у технічному відділі гірничого підприємства не менше 5 років.

У процесі оцінки кожному з 16 критеріїв привласнюється власний ранг від 1 до 16, залежно від пріоритету цього критерію щодо інших. Після цього експертам необхідно визначити важливість (вагу) кожного критерію, що вимірюється у відсотках. Основними умовами при встановленні важливості критерію є: величина важливості зменшується при збільшенні номера рангу критерію, при цьому сума важливості всіх критеріїв повинна дорівнювати 100 %. Наприклад якщо критерій має 5 ранг із важливістю 10 %, то важливість наступного критерію з 6 рангом, не може перевищувати 10 %.

Слід зазначити, що всі критерії, які описують безпечність технології і собівартість розробки 1 т корисної копалини при різних технологіях, будуть мати максимальні ранги (прагнути до 1), їхня важливість також буде мати максимальні значення. У той же час, критеріям, які представляють другорядні значення з фінансового й організаційного боку роботи підприємства, привласнюються мінімальні ранги (прагнуть до 16) і мінімальна важливість.

Як було визначено раніше для розробки методики визначення нормованої ваги оцінки кожного з 16 критеріїв, розглянутих раніше, необхідно залучити як мінімум чотирьох експертів, які в результаті своєї роботи досягнуть загального рішення щодо ранжирування критеріїв, а також важливості кожного з них, при оцінці технологічних схем розробки родовища.

Під час оцінки рангу ( $r$ ) і важливості ( $v$ , %) кожного критерію встановлюється думка кожного експерта. Послідовність методики визначення рангу й важливості кожного з 16 критеріїв наведена нижче.

1. Визначається кількість експертів ( $N_E$ ) і критеріїв ( $N_K$ ) на підставі чого складається матриця з відповідною кількістю рядків і стовпців.

2. У всіх клітинках, на перетинанні рядка ( $i$ ) і стовпців ( $r$ ) і ( $v$ ), кожним експертом встановлюється ранг і важливість встановлених раніше критеріїв.

3. Ранг критерію ( $r$ ) у кожному стовпці привласнюється експертом на основі власного досвіду в міру зменшення важливості від 1 до 16. Найбільш важливим критерієм є критерій з оцінкою 1, у той час, як оцінку 16 має критерій з мінімальною важливістю. Ранг критерію ( $r$ ) не може повторюватися, проте як важливість даного критерію ( $v$ ) може збігатися по величині з важливістю сусідніх рангів. При цьому важливість більшого критерію, не може чисельно перевищувати важливість більшого критерію.

4. При роботі експертів, важливою умовою є необхідність визначення важливості ( $v$ , %) для кожного критерію таким чином, що б їхнє сумарне значення становило 100 %. Це дозволить врівноважити оцінку кожного експерта й надалі визначити середньозважені ранги ( $r$ ) і важливості ( $v$ , %) для кожного критерію.

5. Після заповнення експертами форми з рангами ( $r$ ) і важливістю ( $v$ , %) за кожним критерієм виконується встановлення середньозважених показників, які будуть використовуватися при подальшій оцінці ефективності технологічних схем розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ:

$$r_n = \frac{\sum_{i=1}^n r_{in}}{N_{E_n}}, \quad (1)$$

де  $r$  – ранг критерію;  $n$  – номер критерію;  $i$  – номер експерта;  $N_E$  – кількість експертних оцінок за одним критерієм.

$$v_n = \frac{\sum_{i=1}^n v_{in}}{N_{E_n}}, \% \quad (2)$$

де  $v$  – важливість критерію, %.

Відповідно до розробленої методики, для визначення нормованого рангу ( $r$ ) і важливості ( $v$ , %) кожного з 16 розглянутих критеріїв, до опитування залучено чотири експерта [10], які мають досвід в проектуванні при розробці родовищ корисних копалин відкритим способом. В якості експертів виступили к.т.н. Лазніков О.М., к.т.н. Вінівітін В.Д., к.т.н. Куліш В.А., к.г.м.н. Гайдін А.М.

В результаті проведеної експертної оцінки опрацьовано анкетні данні, які дозволяють провести подальші дослідження зі встановлення середньозважених рангів і важливості кожного критерію. Аналіз анкетних даних та використання виразів (1) і (2) дозволили ранжувати і встановити важливість кожного з 16 критеріїв ефективності (табл. 1).

Таблиця 1

Експертна оцінка рангів і важливості критеріїв, які впливають на розробку обводнених титан-цирконієвих родовищ

Найменування критерію	Експерт 1		Експерт 2		Експерт 3		Експерт 4		Ранг	Важливість
	$r_1$	$v_1, \%$	$r_2$	$v_2, \%$	$r_3$	$v_3, \%$	$r_4$	$v_4, \%$	$r_E$	$v_E, \%$
Критерій ( $K_1$ )	2	10	1	12	1	12	1	12	<b>1,25</b>	<b>11,50</b>
Критерій ( $K_2$ )	8	5	5	8	6	8	7	8	<b>6,50</b>	<b>7,25</b>
Критерій ( $K_3$ )	6	6	4	9	7	8	6	9	<b>5,75</b>	<b>8,00</b>
Критерій ( $K_4$ )	10	5	2	11	12	3	12	4	<b>9,00</b>	<b>5,75</b>
Критерій ( $K_5$ )	9	5	9	6	9	6	5	9	<b>8,00</b>	<b>6,50</b>
Критерій ( $K_6$ )	4	8	11	5	11	4	8	5	<b>8,50</b>	<b>5,50</b>
Критерій ( $K_7$ )	5	8	16	2	13	2	11	4	<b>11,25</b>	<b>4,00</b>
Критерій ( $K_8$ )	1	12	8	6	2	11	2	12	<b>3,25</b>	<b>10,25</b>
Критерій ( $K_9$ )	3	10	3	9	3	10	16	1	<b>6,25</b>	<b>7,50</b>
Критерій ( $K_{10}$ )	7	6	14	3	4	10	3	12	<b>7,00</b>	<b>7,75</b>
Критерій ( $K_{11}$ )	16	3	13	4	15	2	10	5	<b>13,50</b>	<b>3,50</b>
Критерій ( $K_{12}$ )	14	4	12	4	10	5	13	3	<b>12,25</b>	<b>4,00</b>
Критерій ( $K_{13}$ )	11	5	15	3	14	2	9	6	<b>12,25</b>	<b>4,00</b>
Критерій ( $K_{14}$ )	13	5	7	6	16	1	14	2	<b>12,50</b>	<b>3,50</b>
Критерій ( $K_{15}$ )	12	5	10	5	8	7	4	7	<b>8,50</b>	<b>6,00</b>
Критерій ( $K_{16}$ )	15	3	6	7	5	9	15	1	<b>10,25</b>	<b>5,00</b>
Разом, %		100		100		100		100		<b>100</b>

Аналіз результатів середньозважених рейтингів (табл. 1) показує, що всі вони мають відмінність окрім критеріїв  $K_6$  і  $K_{15}$  (Ранг 8,5) і  $K_{12}$  і  $K_{13}$  (Ранг 12,5). Для критеріїв з однаковими рангами, які мають різну важливість, рейтингування виконується відповідно до неї, а для критеріїв з однаковим рангом і важливістю ранжування виконується за алфавітом відповідно до першої літери критерію. Кожному критерію, відповідно до експертного рангу  $r_E$ , в подальшому присвоюється остаточний ранг  $r$ , який має ціле значення від 1 до 16.

Як видно з наведених даних (табл. 1) найбільш важливим критерієм, з вищим рангом є перший критерій ( $K_1$ ), за яким оцінюється безпека технології розробки родовища, а його важливість дорівнює 11,5 %. Це пояснюється тим, що питання безпеки життєдіяльності працівників у будь якій сфері є пріоритетним і потребують максимальної уваги зі сторони роботодавця.

На другому місці за рангом розташувався показник витрат на видобуток руди, т/грн. ( $K_8$ ), при цьому важливість цього показника експертами оцінюється в 10,25 %. Цей критерій надзвичайно важливий при оцінці інвестиційної привабливості технологічних схем при проектуванні, а також безпосередньо впливає на ефективність роботи підприємства.

На третьому місці знаходиться критерій, який оцінює можливість застосування технологічної схеми в обмежених земельних умовах ( $K_3$ ) з важливістю 8 %. За цим критерієм встановлюється неможливість використання деяких технологічних схем в умовах обмежених земельних ресурсів. Дане питання найбі-

льше відноситься до технологічних схем з підвищеним утворенням відходів і неможливістю їхнього розміщення біля кар'єру через законодавчі причини і брак вільних земель.

Четвертим рангом оцінюється критерій, який враховує надійність (довговічність) технології ( $K_9$ ) з важливістю 7,5 %. Максимально ефективними технологічними схемами за цим критерієм будуть ті, в яких застосовується обладнання з великим амортизаційним терміном і строком експлуатації.

П'ятим за рангом іде критерій, який характеризує вплив виймально-навантажувального устаткування на втрату основної сировини при видобутку корисної копалини ( $K_2$ ), що оцінюється важливістю в 7,25 %. Цей критерій відповідає за оцінку технологічної схеми за показником втрати важких мінералів при розробці обводнених родовищ, пов'язаної із застосуванням різного виймально-навантажувального устаткування (земснаряди, крокуючі та гідравлічні екскаватори).

Визначення ефективності технологічної схеми за критерієм захисту навколишнього природного середовища ( $K_{10}$ ) здійснюється за 6 рангом і оцінюється важливістю в 7,75 %. Даний критерій дозволяє оцінювати технологічні схеми за показниками відходів, забруднення атмосфери, ґрунтових і поверхневих вод.

Критерій, що враховує витрати на водовідведення (осушення) кар'єру й створення резервуару з технічною водою ( $K_5$ ) оцінений 7 рангом з важливістю 6,5 %. Цей критерій буде відмінним для технологічних схем, які передбачають спорудження водотривких стін, використання фільтраційних свердловин і гідромеханізований спосіб видобутку корисної копалини земснарядами.

Восьмим за рангом йде критерій, що враховує витрати на видобуток руди в кар'єрі з урахуванням землекористування ( $K_6$ ), що оцінюється важливістю в 5,5 %. Цей критерій залежить від ефективності поводження з територіями гірничого і земельного відводів кар'єру.

Після нього розташовано критерій ( $K_{15}$ ) з 9 рангом, яким оцінюється рівень утворення відходів у кожній технологічній схемі з важливістю 6 %. При встановленні ефективності схем розробки кар'єра, даний критерій залежить від обсягу відходів, які формуються при видобутку одиниці корисної копалини.

Десятий ранг отримав критерій, що характеризує можливість господарської діяльності на порушених землях кар'єру ( $K_4$ ) з важливістю 5,75 %. При оцінці цього критерію мова йде про використання порушених земель гірничого й земельного відводу (розміщення на поверхні внутрішніх відвалів сонячних електростанцій). Розмір площі задіяних земель буде різний при різних технологічних схемах розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ. Особлива відмінність буде спостерігатися в схемах з різною площею хвостохранилища, а також у випадку формування техногенного родовища.

Критерієм, який отримав 11 ранг, оцінюється можливість формування техногенного родовища ( $K_{16}$ ) з розкритих і вміщаючих порід. Важливість цього критерію складає 5 % при оцінюванні технологічних схем за показниками ресурсозбереження.

На дванадцятому місці знаходиться критерій, яким оцінюються технологічні схеми за показниками витрати на видобуток руди з урахуванням розробки

супутніх корисних копалин з розкривних і вміщаючих порід родовища, т/грн ( $K_7$ ). Його важливість оцінюється в 4 %.

Оскільки різні технологічні схеми розробки обводненого титан-цирконієвого родовища припускають різне поводження з вміщаючими породами, під 13 рангом розташувався критерій, яким враховується проектна площа хвостохранилища ( $K_{12}$ ) з важливістю 4 %. Критерій, що враховує селективний видобуток корисних копалин ( $K_{13}$ ) оцінюється 14 рангом з важливістю 4 %.

До 15 рангу віднесено критерій, що характеризує зменшення площі землі, порушеної кар'єрами будівельних матеріалів, від залучення супутньої сировини титан-цирконієвого родовища ( $K_{14}$ ), з важливістю 3,5 %. Даний показник враховує вплив залучення супутніх корисних копалин у реалізацію на регіональному ринку сировини будівельних матеріалів, що у свою чергу дозволяє скоротити видобуток цієї сировини, як основної на кар'єрах нерудних матеріалів. За рахунок цього можливе зменшення площі земель, порушених розробкою кар'єрів.

На останньому за важливістю місці розташувався критерій, яким оцінюється технологічна схема з позиції забезпечення ринку супутньою сировиною, яка видобувається з розкривних і вміщаючих порід і може використовуватися у регіональній будівельній промисловості ( $K_{11}$ ) із важливістю 3,5 %. Цей критерій ураховує ефективність організації технологічної схеми з позиції видобутку й реалізації попутної сировини з метою зменшення гірничопромислових відходів.

Для подальших досліджень ефективності технологічних схем узагальнено експертні ранги ( $r_E$ ) й важливість ( $v_E$ ) кожного з 16 критеріїв, які будуть використовуватися у подальших дослідженнях (табл. 2).

Виконана розстановка рангів і важливості критеріїв (табл. 2) дозволяє перейти до вирішення завдань з досліджень спрямованих на розробку методики визначення оптимальної технологічної схеми відробки обводнених титан-цирконієвих родовищ.

Слід зазначити, що з 16 критеріїв, запропонованих експертами, чотири з них безпосередньо характеризують економічні показники:

- витрати на водовідведення (осушення) кар'єру й створення резервуара з технічною водою ( $K_5$ ), грн./рік;
- витрати на видобуток руди з урахуванням землекористування ( $K_6$ ), т/грн.;
- витрати на видобуток руди з урахуванням розробки супутніх корисних копалин ( $K_7$ ), т/грн.;
- витрати на видобуток руди ( $K_8$ ), т/грн.

Оцінка цих показників у загальній методиці вибору оптимальної технологічної схеми розробки обводнених родовищ виконується на підставі техніко-економічного розрахунку, при цьому не вимагає експертної оцінки у вигляді виставлення балів. У світовій практиці найпоширенішим варіантом оцінювання економічних показників є співставлення собівартості [11] розробки технологічної схеми, яка має найкращі показники, з іншими схемами шляхом визначення відсоткової різниці:

$$\Delta C = \frac{C_n - C_1}{C_1} \cdot 100\%, \quad (3)$$



де  $C_1$  – економічний показник (собівартість, витрати та ін.) найкращої схеми, грн.;  $C_n$  – економічні показники  $n$ -ої схеми розробки, грн.

Після встановлення відсоткової різниці виконується розрахунок балів економічного критерію для кожної технологічної схеми, згідно із запропонованим виразом:

$$m = 10 \cdot v_E \cdot (1 - \Delta C), \quad (4)$$

де  $v$  – важливість критерію, встановлена експертною групою (табл. 2).

Таблиця 2

Оцінка критеріїв за рангом і важливістю при виборі ефективної технологічної схеми розробки обводнених родовищ

№	Найменування критерію (параметра)	Ранг, r	Важливість, v, %
1	Безпека технології (рівень безпеки)	1	11
2	Вплив виймально-навантажувального устаткування на втрату основної сировини при видобутку	5	8
3	Можливість застосування технологічної схеми в обмежених земельних умовах	3	8
4	Можливість господарської діяльності на порушених землях за рахунок зменшення площі хвостохранилища	10	6
5	Витрати на водовідведення (осушення) кар'єру й створення резервуара з технічною водою, грн. /рік	7	6
6	Витрати на видобуток руди з урахуванням землекористування, т/грн.	8	6
7	Витрати на видобуток руди з урахуванням розробки супутніх корисних копалин, т/грн.	12	4
8	Витрати на видобуток руди, т/грн.	2	10
9	Надійність (довговічність) технології	4	8
10	Негативний вплив технологічної схеми на навколишнє природне середовище	6	8
11	Забезпечення ринку супутньою сировиною для будівельної промисловості	16	3
12	Проектна площа хвостосховища	13	4
13	Селективне видобування супутніх корисних копалин	14	4
14	Зменшення площі порушених земель в регіоні за рахунок залучення супутньої сировини титан-цирконієвого родовища	15	3
15	Рівень утворення відходів	9	6
16	Формування техногенного родовища	11	5
	<b>Разом</b>		<b>100</b>

Інші 12 критеріїв, які не мають чітко виражених економічних показників, оцінюються під час науково-дослідних робіт, пов'язаних з визначенням основних параметрів технологічних схем. У таблиці напроти кожного критерію (рядок) для кожної технологічної схеми виставляється оцінка від 1 до десяти з використанням техніко-аналітичного методу досліджень. Оцінка 10 ставиться в тому випадку, якщо схема має найкращі показники за оцінюваним критерієм се-

ред альтернативних варіантів. Оцінка один бал виставляється для схеми з найгіршими показниками, яку категорично не рекомендується застосовувати. Схеми, які теоретично можуть бути застосовані, повинні мати оцінку не менше 6.

Результати техніко-аналітичної оцінки критеріїв різних технологічних схем ( $v_{11} - v_{mn}$ ) пропонується заносити в запропоновану таблицю (табл. 3).

Таблиця 3

Таблиця до методики оцінки ефективності технологічних схем розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ

	Важливість критерію	ТС 1	ТС 2	...	ТС n
Критерій 1	$V_{j1}$	$v_{11}$	$v_{12}$	...	$v_{1n}$
Критерій 2	$V_{j2}$	$v_{21}$	$v_{22}$	...	$v_{2n}$
...	...	...	...	...	...
Критерій n	$V_{jn}$	$v_{n1}$	$v_{n2}$	...	$v_{nn}$
Загальна оцінка схеми	X	$\sum_{i=1}^n v_{i1} \cdot V_{ji}$	$\sum_{i=1}^n v_{i2} \cdot V_{ji}$	...	$\sum_{i=1}^n v_{in} \cdot V_{ji}$

Після оцінювання 12 технологічних і природоохоронних критеріїв (табл. 3), визначається загальна оцінка технологічної схеми, при цьому в стовпці «важливість критерію ( $V_{jn}$ )» вже виставлені показники важливості, які були визначені за допомогою ранжування критеріїв шляхом експертної оцінки (табл. 2).

Для визначення загальної оцінки кожної технологічної схеми необхідно помножити показник важливості критерію на оцінку критерію по кожній технологічній схемі  $v_{i1} \cdot V_{ji}$ , а у випадку оцінки економічного критерію скористатися виразом (4). Після цього, оцінки всіх критеріїв по кожній технологічній схемі підсумовуються  $\sum_{i=1}^n v_{i1} \cdot V_{ji}$ , що дозволяє визначити загальну оцінку технологічної схеми. Схема з найбільшою оцінкою рекомендується до впровадження, у той час як схеми з мінімальними балами вимагають доопрацювання або виключаються зі списку можливих до застосування.

**Висновки.** Виконаний аналіз факторів, які впливають на вибір технологічної схеми розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ, дозволив визначити 16 найбільш важливих критеріїв, які в різній ступені впливають на прийняття технологічних рішень. Для обґрунтування впливу важливості кожного критерію на вибір технологічної схеми, була встановлена необхідність залучення чотирьох експертів в області відкритої розробки родовищ, які виконали ранжування кожного критерію й встановили їх важливість. При розробці методики визначення нормованої важливості оцінки кожного з розглянутих критеріїв вони були розділені на економічні, технологічні й природоохоронні. При цьому для визначення оцінки за економічними критеріями запропоновано визначати відсоткову різницю між показниками найкращої технологічної схеми й інших схем.

Розроблена методика визначення оптимальної технологічної схеми враховує важливість кожного з 16 критеріїв, які в різній ступені впливають на вибір технологічної схеми розробки обводненого титан-цирконієвого родовища.

#### Перелік посилань

1. Ordin, A. A., & Schwabenland, E. E. (2016). Evaluation of technological parameters for apatite extraction by surface miners. *Journal of Mining Science*, 52(2), 293-299.
2. Dehghani, H., & Ataee-pour, M. (2013). Determination of the effect of economic uncertainties on mining project evaluation using Real Option Valuation. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 4(4), 265-277.
3. Inthavongsa, I., Drebenstedt, C., Bongaerts, J., & Sontamino, P. (2016). Real options decision framework: Strategic operating policies for open pit mine planning. *Resources Policy*, 47, 142-153.
4. Krutov, G., & Savitskyi, A. (2014). Economic evaluation of efficiency of investments into energy-saving controlled electric drives of conveyers of mining and processing works. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 78-81.
5. Savolainen, J., Collan, M., & Luukka, P. (2017). Analyzing operational real options in metal mining investments with a system dynamic model. *The Engineering Economist*, 62(1), 54-72.
6. Hustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). Open Pit Mine Planning and Design, Two Volume Set & CD-ROM Pack: V1: Fundamentals, V2: CSMine Software Package, CD-ROM: CS Mine Software. CRC Press.
7. Haque, M. A., Topal, E., & Lilford, E. (2017). Evaluation of a mining project under the joint effect of commodity price and exchange rate uncertainties using real options valuation. *The Engineering Economist*, 62(3), 231-253.
8. Savolainen, J. (2016). Real options in metal mining project valuation: Review of literature. *Resources Policy*, 50, 49-65.
9. Wang, Q., Xu, X., Gu, X., Liu, J., & Wang, X. (2012). Ecological footprint and ecological costs in open-pit metal mining. *Resources Science*, (11), 18.
10. Zemlickienė, V., Mačiulis, A., & Tvaronavičienė, M. (2017). Factors impacting the commercial potential of technologies: expert approach. *Technological and Economic Development of Economy*, 23(2), 410-427.
11. Hartman, J. C. (2000). On the equivalence of net present value and market value added as measures of a project's economic worth. *The Engineering Economist*, 45(2), 158-165.

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Разработка методологических принципов выбора эффективной технологической схемы обработки обводненных титано-циркониевых месторождений с учетом экономических, технических и природоохранных факторов.

**Методика исследований.** Аналитический метод исследований применялся при анализе факторов, влияющих на выбор критериев для оценки эффективности технологических схем разработки обводненных титано-циркониевых месторождений. Метод технико-экономического анализа использовался при разработке рекомендаций по оценке экономических критериев для различных технологических схем, которые могут применяться в условиях разработки обводненного карьера.

**Результаты исследований.** Установлены основные 16 критериев, которые в различной степени учитываются при выборе технологической схемы разработки обводненных титано-циркониевых месторождений. Выполнена экспертная оценка по ранжированию и установлению важности каждого из приведенных критериев. Установлено, что для оценки 16 критериев согласно использованию коэффициента согласованности (коэффициента конкордации Кендалла) целесообразно привлечение 4 экспертов в области разработки открытой разработки месторождений.

**Научная новизна.** Впервые предложена методика определения оптимальной технологической схемы разработки обводненных титано-циркониевых месторождений путем установления нормированной важности оценки основных 16 критериев, влияющих на выбор технологической схемы, которые включают: экономические, технологические и природоохранные составляющие. При этом оценивание экономических показателей каждой схемы предлагается производить путем определения процентной разницы между показателями наилучшей схемы с остальными схемами разработки.

**Практическое значение.** Разработаны методологические основы оценки эффективности ресурсосберегающих технологий, которые применяются при отработке обводненных титано-циркониевых месторождений полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** *открытая разработка, методика выбора, карьер, обводненные месторождения, критерий оценки, эксперт, технологическая схема, нормированная важность, ранжирование*

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of methodological principles for evaluation the technological chart effectiveness at the development flooded titanium-zirconium deposits, taking into account economic, technological and environmental factors.

**Research methodology.** The analytical research method used for analyze factors affecting on selection the effectiveness evaluating criteria of technological schemes at the developing flooded titanium-zirconium deposits. The method of technical and economic analysis used for recommendations development at the choosing assessing economic criteria for various technological charts that can be used in surface mining of flooded deposits.

**The results.** The main 16 criteria have been established, which are taken into account to varying degrees when choosing a technological scheme for the mining of flooded titanium-zirconium deposits. An expert assessment was performed on the ranking and establishment of each criteria importance. It has been established that to evaluate 16 criteria according the consistency coefficient (Kendall concordance coefficient), it is advisable to involve 4 experts in the field of flooded titanium-zirconium deposits development.

**Scientific novelty.** For the first time, a methodology has been proposed for determining the optimal technological chart of flooded titanium-zirconium deposits development by establishing the normalized importance of assessing the main 16 criteria that affect on the choice of technological chart, which include: economic, technological and organizational components. At the same time it is proposed to evaluate the economic indicators of each chart by determining the percentage difference between the indicators of the best chart with other technological charts.

**Practical value.** The methodological basis for evaluating the effectiveness of resource-saving technologies that can be used at the development of flooded titanium-zirconium mineral deposits has been developed.

**Keywords:** *surface mining, evaluation methodology, pit, flooded deposits, assessment criteria, expert, technological scheme, normalized importance, ranking*