УДК 622.271

Підвищення ефективності землезбереження при розробці родовищ титан-цирконієвих руд шляхом впровадження технологій замкнутого циклу

Ложніков О.В., *д-р техн. наук, професор, ORCID ID 0000-0003-1231-0295,*
e-mail: Lozhnikov.O.V@nmu.one;
НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,

Досліджено актуальну проблему мінімізації екологічних наслідків видобутку критичної сировини в Україні на прикладі розробки обводненої Мотронівсько-Аннівської ділянки Малишевського титан-цирконієвого родовища. Низький вміст корисних компонентів (близько 1% у гірничій масі) за традиційних технологій вимагає значного відчуження земель під хвостосховища. Метою роботи є оцінка впливу технологій замкнутого циклу на показники землекористування гірничого підприємства. Методом математичного моделювання проведено порівняльний аналіз динаміки порушення земель для класичної та запропонованої схем протягом перших 20 років експлуатації кар'єру. Запропоновано технологічне рішення, що передбачає попереднє збагачення руди біля розрізної траншеї з поверненням 80% відходів у внутрішній відвал та впровадження цеху переробки хвостів стаціонарної фабрики. Це дозволяє утилізувати кварцові піски для будівельної галузі та впровадити паралельну потокову рекультивацію. Доведено, що за замкнутого циклу площа порушених земель за 20 років збільшиться лише у 3,1 рази (з 27 до 84 га), тоді як за класичної схеми – у 6,3 рази (до 209 га). Наукова новизна полягає у визначенні динамічного ефекту землезбереження, який математично доводить доцільність поєднання технологій замкнутого циклу із безперервним відновленням порушених земель.

Ключові слова: технологія замкнутого циклу, титан-цирконієві родовища, землезбереження

Improving the efficiency of land conservation during the development of titanium-zirconium deposits through the implementation of closed-cycle technologies

Lozhnikov Oleksii, *Dr. Tech. Science, Professor, ORCID ID 0000-0003-1231-0295,*
e-mail: Lozhnikov.O.V@nmu.one;
*Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*This study addresses the pressing issue of minimizing the environmental impact of critical raw material extraction in Ukraine, using the water-saturated Motronivka-Annivka section of the Malyshivske titanium-zirconium deposit as a case study. Due to the low content of valuable components (approximately 1% of the mined mass), traditional technologies necessitate the allocation of vast land areas for tailings storage facilities. The study aims to evaluate the impact of closed-cycle technologies on the mining enterprise's land-use metrics. Mathematical modeling was employed to compare land disturbance dynamics under the conventional and proposed schemes over the first 20 years of open-pit operations. A technological solution is proposed that involves preliminary ore beneficiation near the initial excavation trench, returning 80% of the waste to an internal dump, and implementing a tailings processing unit at the stationary plant. This approach enables the utilization of quartz sands in the construction industry and facilitates concurrent land reclamation. It is demonstrated that, under a closed-cycle system, the area of disturbed land would increase only 3.1-fold (from 27 to 84 hectares) over 20 years, whereas the conventional scheme would result in a 6.3-fold increase (to 209 hectares). The scientific novelty lies in identifying the dynamic land-conservation effect, which mathematically substantiates the benefits of combining closed-cycle technologies with the continuous restoration of disturbed land.

Keywords: closed-cycle technology, titanium-zirconium deposits, land conservation

Вступ. Освоєння критичної мінеральної сировини є вагомим рушієм економічного зростання та промислового розвитку України. Оскільки наша країна володіє значним запасом різних видів корисних копалин, найбільш перспективним є розробка родовищ, запаси яких встановлені, а інфраструктура підготовлена до швидкого збільшення промислових потужностей. До таких родовищ в Україні можна віднести титан-цирконієві, за запасами яких наша країна входить до п'ятірки світових лідерів. В цих родовищах містяться ільменіт, рутил та циркон та інші, що дозволяє ефективно застосовувати комплексний підхід.

Найбільш перспективним для освоєння титан-цирконієвих руд в Україні на сьогодні є Мотронівсько-Аннівська ділянка Малишевського родовища, оцінені запаси якого складають понад 150,0 млн м^3. При проєктній продуктивності кар'єру 2,7 млн м^3, термін його експлуатації складатиме 55 років. За цей час має бути відпрацьовано більше 840 млн м^3 гірничої маси, з яких породи розкриву сягатимуть майже 700 млн м^3, у хвостосховища буде спрямовано понад 140 млн^3 хвостів збагачення. Такі значні об'єми відходів виробництва і хвостів збагачення обумовлені вкрай низьким вмістом титан-цирконієвих металів у руді і в

цілому в гірничій масі у контурах кар’єру. За попередніми оцінками у руді міститься лише 5 % цінних мінералів по об’єму, у той час як гірничій масі кар’єру їх частка складає приблизно 1 %. Формування таких великих об’ємів відходів виробництва разом з хвостами збагачення призводить до необхідності залучення великих площ додаткових земель, які можуть перевищувати розміри самих гірничих виробок кар’єру.

Таким чином питання комплексного освоєння титан-цирконієвих родовищ у поєднанні з принципами технологій замкнутого циклу дозволять підвищити рівень вилучення цінної мінеральної сировини з хвостів збагачення. Також за рахунок розділення і подальшого окремого складування піщано-глинистої суміші, що міститься у руді, з’явиться можливість суттєво зменшити площі хвостосховищ з перетворенням техногенного ресурсу на супутні корисні копалини.

Виклад основного матеріалу. Метою проведених досліджень є встановлення впливу впровадження технологій замкнутого циклу у розробку титан-цирконієвих родовищ на показники землекористування гірничого підприємства.

Впровадження технологій замкнутого циклу, які включають у себе оптимізацію процесів збагачення руди і управлінні відходами, дозволяють суттєво покращити показники рекультивації земель та підвищити ефективність землекористування. Для даних родовищ замкнутий цикл передбачає видобуток руди в кар’єрі, після чого вона спрямовується на збагачувальну фабрику колективного концентрату поряд з розрізною траншеєю, де відбувається попереднє відділення важкої фракції від вмісних порід. Цей процес безпосередньо впливає на організацію роботи усього підприємства, адже понад 80 % від усього об’єму руди відділяється з мінімальними енерговитратами і складується у внутрішньому відвалі кар’єру без необхідності подальшого транспортування за стаціонарну збагачувальну фабрику.

Решта 20 % руди з важкою мінеральною фракцією спрямовується на стаціонарну збагачувальну фабрику, що розташована поряд із капітальною траншеєю. На стаціонарній фабриці відбувається відділення важкої фракції і за класичної технології решта піщано-глинистої суміші з доводками збагачення спрямовується на хвостосховище. Відмінність технології замкнутого циклу полягає у впровадженні у виробничий цикл цеху переробки хвостів збагачення, що розміщується на виході зі стаціонарної збагачувальної фабрики. За рахунок цієї зміни у технологічному ланцюгу, важка мінеральна фракція у повному об’ємі вилучається з рудних пісків, а у відвали потрапляють лише вмісні породи.

Результати. Запропоновані технологічні підходи безпосередньо впливають на ключові показники землекористування. В основному це відбувається за рахунок скорочення площі тимчасово вилучених земель для розміщення хвостів збагачення. Традиційний видобуток вимагає величезних територій під зовнішні хвостосховища, оскільки до 95% руди представлені вмісними піщано-глинистими породами. Таким чином застосування замкнутого циклу дозволяє мінімізувати ці площі, при цьому вмісні рудні піщано-глинисті породи окремо розміщаються у внутрішньому відвалі. Оскільки вмісні породи після збагачення руди одразу повертаються у вже відпрацьований простір кар’єру, тому повністю зникає потреба у відчуженні нових ділянок під довгострокові зовнішні хвостосховища.

Наступною перевагою технології замкнутого циклу є те, що додатково виникає можливість прискорити темпи рекультивації та повернути землі в економічне використання. В існуючій технологічній схемі рекультивація хвостосховищ починається лише після повного завершення відпрацювання кар'єру. Данна технологічна схема дозволяє виконувати паралельну рекультивацію поверхні внутрішнього відвалу, що стабілізувалася, включаючи ті ділянки де розташовуються окремо заскладовані вмісні піщані та глинисті породи.

Таким чином на кар’єрі перед розрізною траншеєю одночасно знімається родючий шар ґрунту, а позаду внутрішній відвал одразу заповнюється, планується і рекультивується. Таким чином значна площа внутрішнього відвалу вже через 3–5 років може бути потворо використана, замість очікування 20–30 років поки настане можливість відновити поверхні хвостосховищ.

Наступною перевагою впровадження технологій замкнутого циклу у розробку титан-цирконієвих родовищ є можливість отримувати додаткові об’єми збагачених кварцових

пісків, які за існуючої технології потрапляють у хвостосховище. Технології замкнутого циклу передбачають його зневоднення, очищення від глини та утилізацію. Сухе складування та ресайклінг замість створення величезних наливних хвостосховищ, які вилучають родючі землі та несуть екологічні ризики. В подальшому він може бути використаний як сировина для будівельної галузі.

У випадку розробки Мотронівсько-Аннівської ділянки, технологія замкнутого циклу також має перевагу за рахунок скорочення використання об'ємів технічної води. Замкнутий водний цикл значно полегшує дану проблему оскільки 80 % руди відділяється на збагачувальній фабриці колективного концентрату поряд на борту кар'єру, що знімає необхідність використовувати додаткових об'ємів води для транспортування на стаціонарну збагачувальну фабрику.

Новизна дослідження. Для встановлення впливу технології замкнутого циклу на показники землезбереження в умовах розробки Мотронівсько-Аннівської ділянки Малишевського родовища титан-цирконієвих руд виконаємо математичне моделювання з для визначення площі порушених земель у кожний рік розробки протягом перших 20 років експлуатації родовища.

Під час розрахунків прийнято проєктну продуктивність кар'єру, його розміри та об'єми хвостів збагачення що утворюються на стаціонарній збагачувальній фабриці для класичної технології розробки родовища. Для технологічної схеми за принципами замкнутого циклу приймаємо аналогічні параметри продуктивності та розмірів кар'єрного поля, однак відмінність буде полягати у відсутності хвостів збагачення, та послідовній рекультивації поверхні внутрішнього відвалу після його стабілізації. Результати отриманих досліджень наведено на рис. 1.

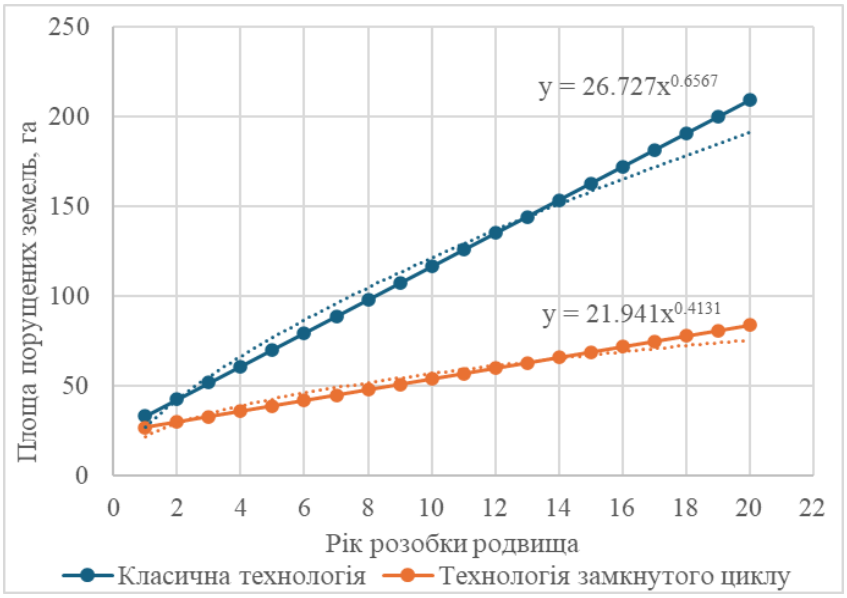

Рисунок 1. Вплив технологічної схеми розробки родовища на площі порушених земель протягом 20 років розробки

Відповідно до отриманих результатів досліджень за класичної технологічної схеми площа порушених земель зросте у 6,3 ризи з 33 до 209 га протягом перших 20 років розробки родовища, у той час як при запропонованій схемі розробки площа порушених земель збільшиться у 3,1 рази з 27 до 84 га. Це відбувається за рахунок відсутності земель де розташовано хвостосховище, і пов'язані з цим затримки робіт з рекультивації.

Отримані результати досліджень дозволяють встановити землезберігаючий ефект від запровадження технології замкнутого циклу, який визначається як відношення різниці між площею збережених земель і площею порушених земель при існуючій технологічній схемі. Результати розрахунків наведено на рис. 2.

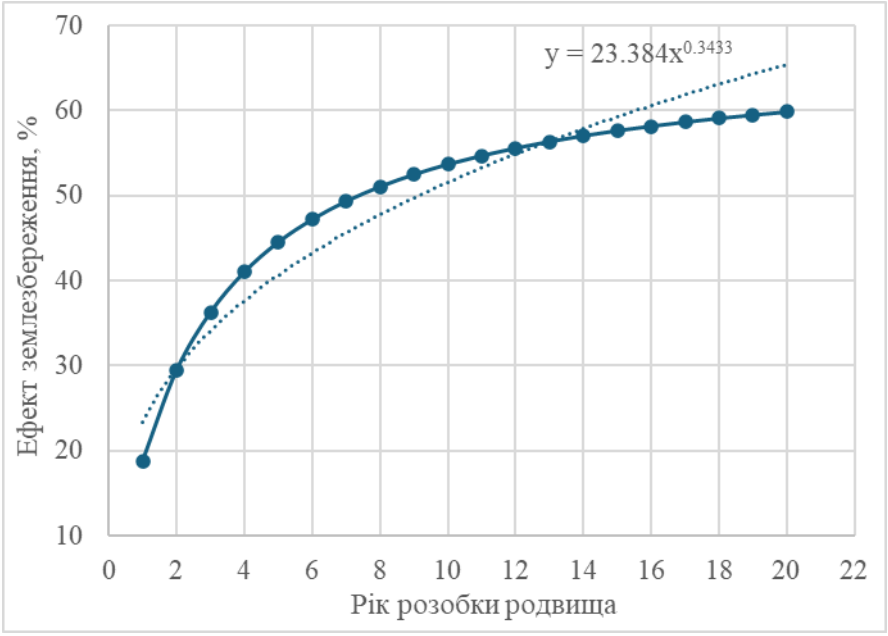

Рисунок 2. Залежність ефекту землезбереження від року розробки родовища

Відповідно до отриманих даних (рис. 2) ефект землезбереження від запровадження технології закинутого циклу буде лише посилюватися з часом після початку проведення гірничих робіт. За 20 років експлуатації кар'єру він зросте з 19 до 60%, що ще раз підтверджує ефективність запровадження запропонованих технологічних рішень вже з перших років розробки.

Висновки. Встановлені результати досліджень підтверджують ефективність запропонованої технології замкнутого циклу на показники землезбереження в умовах розробки обводнених титан-цирконієвих родовищ.

Визначено, що при застосуванні класичної технологічної схеми розробки титан-цирконієвого родовища площа порушених земель за перші 20 років експлуатації кар'єру зросте у 6,3 ризи з 33 до 209 га. Запропонована технологічна схема замкнутого циклу при розробці родовища дозволяє досягти цього збільшиться лише у 3,1 рази з 27 до 84 га за рахунок відсутності хвостосховища і відсутності необхідних робіт з рекультивації на ньому.

Отримані показники ефекту землезбереження від запровадження технології закинутого підтверджують, що за 20 років експлуатації кар'єру він лише зростатиме і сягне 60%, а площа збережених земель на цей момент сягатиме 125 га.

Список використаних джерел:

1 Lozhnikov, O. V., Sobko, B. Y., Pavlychenko, A. V., & Kirichek, Y. O. (2023). Utilization of the secondary resources of titanium-zirconium pits when constructing highways. Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk, (4), 124-129. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/124.

References:

Lozhnikov, O. V., Sobko, B. Y., Pavlychenko, A. V., & Kirichek, Y. O. (2023). Utilization of the secondary resources of titanium-zirconium pits when constructing highways. *Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk*, (4), 124-129. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/124

Подяки. *Представлені результати отримано в рамках виконання Проєкту 2025.02/0048 «Обґрунтування параметрів ресурсозберігаючої технології замкнутого циклу при освоєнні критичної сировини титанових родовищ» за підтримки Національного фонду досліджень України.*