622.271:338.3 http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.094

© В.І. Прокопенко[1], А.Ю. Череп[1], Д.П. Пілова[1]
[1] Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, м. Дніпро, Україна

АКТУАЛЬНИЙ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОДОВИЩА

© V. Prokopenko[1], A. Cherep[1], D. Pilova[1]
[1] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

MODERN ECOLOGYCAL AND ECONOMIC APPROACH TO CHOICE OF DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSIT

Мета. Узагальнення вихідних даних, що впливають на ухвалення рішення щодо технології відпрацювання кар’єрного поля, методичне обґрунтування критеріїв оцінювання еколого-економічної ефективності цих рішень та розробка алгоритму аналізу впливу вихідних даних на ефективність технології видобування корисної копалини у світлі сьогоднішнього стану навколишнього середовища.

Методика дослідження полягає в огляді та систематизації підходів щодо вибору технології відкритої розробки родовища корисних копалин, методичному обґрунтуванні критеріїв аналізу та оцінці факторів, що впливають на еколого-економічну ефективність технологічних комплексів відпрацювання родовища в ринкових умовах господарювання.

Результати дослідження. Розроблений алгоритм оцінювання ефективності технології видобування корисної копалини з урахуванням впливу гірничо-геологічних, технологічних умов й практичних результатів відпрацювання кар’єрного поля. Розраховані витрати на видобування й перероблення рудної сировини, втрати її експлуатаційних запасів та металу, що містить рудна сировини, а також обсяг розкривних порід, причому враховано зміну названих критеріїв оцінки протягом певного етапу експлуатації горизонтального родовища. Результати досліджень авторів вказують на еколого-економічну доцільність роздільного збагачення марганцевої руди (різної якості та вмісту марганцю), що надходять з кар’єрів.

Наукова новизна. Встановлено, що підвищення вмісту марганцю в руді при незначному його вмісті не призводить до суттєвого підвищення коефіцієнту вилучення металу в концентрат, а при високому вмісті його підвищення дозволяє значно підвищити рівень цього вилучення. З метою зниження обсягу металу у відходах збагачення видобуток руди та усереднення її якості по групах кар’єрів слід розподіляти на два рудо-потоки так, щоб в одній групі був отриманий низький, а в другий – високий вміст марганцю в руді.

Практичне значення. Розглянуто екологічні та економічні інтереси гірничодобувних підприємств стосовно обмежених обсягів природних ресурсів та сучасних технологій видобутку й переробки рудної сировини. Запропоновано шляхи зниження впливу відкритих гірничих робіт на обсяги використання природних ресурсів, що ґрунтується на оптимізації виробничої потужності технологічного комплексу гірничих робіт відповідно етапу експлуатації кар’єру за еколого-економічними критеріями ефективності.

Ключові слова. *Технологія відкритої розробки родовища, еколого-економічна ефективність, надрокористування, гірничотехнічна рекультивація, кар’єр, марганцева руда, якість рудної сировини.*

Вступ. Багато гірничих підприємств на тепер знизили обсяги видобутку унаслідок зниження попиту на мінеральну сировину, що явилось сприятливим екологічним заходом. За напрямом застосування прогресивних, безпечних й нешкідливих способів розробки родовищ підприємства надають недостатньо зусиль та засобів, хоча приведення земельних ділянок, що вивільнюються гірничими підприємствами після погашення кар'єру, в стан, придатний для використання за призначенням, передбачено природоохоронним законодавством.

Заміна технологій або окремих процесів видобування й переробки рудної сировини на більш екологічні частіше є мало ефективною. У проектах відкритих гірничих робіт спеціальні обмеження на використання природних ресурсів не розглядаються. Цей напрям може бути реалізований без зниження обсягів випуску й збільшення витрат, він передбачає раціональний розподіл цих обсягів за еколого-економічними критеріями або активізацію виробничих процесів на діючому підприємстві на основі ресурсозберігаючих технологій.

Найбільш землеємною в Україні є гірничодобувна промисловість. Щороку для її потреб виділяють 7-8 тис. га, що належали переважно сільському або лісовому господарствам. Так, при відкритому способі видобування на 1 млн т мінеральної сировини втрати земель складають: для марганцевої руди – 76-600 га, залізної руди – 14-640 га, вугілля – 2,6-43,0 га, нерудної сировини – 1,5-583 га [1].

На ПАТ «Покровський ГЗК» видобувають близько 60 % марганцевої руди в Україні. Для видобутку руди комбінату відведено 11,2 тис. га землі, з яких сільськогосподарські угіддя займають 10,5 тис. га, з них рілля – понад 8,0 тис. га. Марганцева руда залягає тут на глибині 60-65 м й більше, тому на видобуток 1 т руди припадає 17 м^3 породи. Але, як показав досвід, втрати родючого ґрунту можна звести до мінімуму, якщо родючий чорноземний шар ґрунту складувати окремо, наступний шар суглинку та лесу з глибини до 20 м використати для лісонасаджень, а породу найнижчого горизонту (з глибини 40-80 м), зовсім непридатну для землеробства, використати для заповнення вже відпрацьованих кар'єрів [2].

Огляд літератури. Передусім науковці розглядають нові підходи до ощадливого витрачання природних ресурсів на основі раціональних способів розкриття робочих горизонтів кар'єру. Обґрунтовано та проведено вибір раціонального способу розкриття розсипних родовищ, а саме застосування способу розкриття похилими внутрішніми загальними траншеями (тимчасовими або ковзними напівтраншеями – з'їздами) [3]. Виконані Собко Б.Ю і Лазніковим О.М. дослідження [4] дозволяють зробити вибір на користь комбінованого способу розробки обводнених титано-цирконієвих родовищ із застосуванням підводного видобутку руд земснарядами.

Для забезпечення можливості розробки родовища, яке розташоване на незначній відстані від населених пунктів, запропоновано схеми його розкриття із застосуванням стрічкових конвеєрів, що дозволяє значно зменшити розміри санітарно-захисної зони (до 300 м) [5]. До значного зниження впливу на природні ресурси приводять розглянуті Романенком О.В. [6] технологічні схеми відпрацювання крутоспадаючих родовищ із внутрішнім відвалоутворенням. Впровадження в практику таких схем уможливлює зменшення сумарних витрат на розробку родовищ на 7,6-25,1%.

Загалом наукові пошуки щодо еколого-економічних способів розкриття та систем розробки родовищ корисних копалин останнім часом не відзначаються технологічною ефективністю. На думку авторів, це пов’язано з тим, що пошуки ґрунтуються головним чином на традиційних добре апробованих технологіях відкритих гірничих робіт. Ці технології передбачають передусім видобування найбільшого обсягу корисної копалини. Хоча останнім часом вчені демонструють підвищену науково-прикладну зацікавленість в економіко-математичному обґрунтуванні екологічних заходів на різних етапах відпрацювання родовища – від будівництва до закриття гірничого підприємства.

У статті [7] пропонується реальна модель опціону для оцінки вартості видобування рудної сировини відкритим способом в умовах невизначеності її ринкової ціни. Модель ураховує гнучкість технології гірничих робіт, що застосовують кар'єри, залежно від подальшого використання сировини згідно з вмістом в ній корисного компоненту (оброблена чи відправлена у відвал). Названа модель дозволяє максимізувати чисту приведену вартість видобувного комплексу, виходячи з послідовності й швидкості вилучення рудних запасів. Наведений чисельний приклад розрахунків для ілюстрації моделі під впливом невизначеності ціни. Основний результат полягає у встановленні проектної вартості кар'єру, яка може бути значно підвищена шляхом порівняння декількох варіантів використання рудної сировини. У зв’язку з цим можна відзначити цільову функцію максимізації прибутку, який задовольняє власників шахт і акціонерів, що досягається на основі багатокритеріального ухвалення рішення методом UPL [8].

Складена система моделювання робочої зони кар’єру, що ґрунтується на визначенні ймовірних строків і витрат на його закриття [9]. Пропонована структура двовимірної гіпотетичної моделі геологічного блоку для планування параметрів гірничих робіт. У публікації [10] відзначається, що закриття шахти й пов'язані з ним видатки мають бути включені в процес планування, що буде відображати їх роль у формуванні кінцевих результатів: графіку проведення виробок, терміну їх служби шахт, надходження ресурсів і, в підсумку прибутку. Стосовно цієї проблеми показники життєзабезпечення оцінюються й порівнюються за критеріями стабільності місцевих жителів та керівних осіб, що ухвалюють рішення [11]. Тому критерії слід розглядати для запобігання необґрунтованих дій з погляду сприяння сталому розвитку на місцевому рівні.

Глобальна оптимізація для гірничодобувних комплексів спрямована на створення графіку проведення гірничих робіт для різних кар'єрів і технологічних схем, які максимізують економічну цінність підприємства в цілому [12]. Точність у прогнозах приводить до кращого планування гірничих робіт з мінімальними втратами [13]. В кар’єрі складність виробничих процесів через досить невизначене й динамічне природне середовищем обмежує точність прогнозування й змушує підхід реактивного планування, зм'якшуючи відхилення від первісних планів.

Відзначимо також наукові результати, пов’язані з природоохоронною діяльністю гірничих підприємств. На етапі проектування кар'єру визначені кількісні показники екологічних витрат на видобування корисної копалини [14].

В цьому аспекті представлений метод планування графіку гірничих робіт на кар'єрі з урахуванням безпосередньо його прямих екологічних витрат. Результати дослідження [15] показують, що графік при зазначених витратах має нижчі темпи проведення виробок й триваліший термін їх служби, що знижує витрати на 2,5-2,8%.

Виділення невирішених частин проблеми. Гірничодобувна галузь, пов'язана з природо-руйнівним типом управління надрокористуванням, має абсолютну гегемонію в управлінні природними надрами. За відсутності адекватних заходів, спрямованих на охорону природного середовища, розвиток гірничодобувних підприємств став суперечити умовам сталого розвитку галузі. В розглянутих публікаціях недостатньо розроблені методичні засади використання на кар'єрах техніки й технології, орієнтованих безпосередньо на впровадження природоохоронного комплексу гірничих робіт Для підвищення рівня охорони природних ресурсів треба науково обґрунтувати методичний підхід до прийняття раціонального рішення, виходячи з економічного, соціального та екологічного критеріїв ефективності. Сьогодні основні кар'єри України знаходяться на етапі розширеної за масштабами гірничих робіт експлуатації технологічного комплексу, а деякі кар'єри – на етапі доопрацювання родовища та рекультивації порушеної земної поверхні. Тому розв'язання питань, пов'язаних із вибором технології видобування корисної копалини стосовно названих етапів на підставі еколог-економічних критеріїв в наукових публікаціях є важливими та, за браком цієї інформації в наукових працях, потребують методичного обґрунтування.

Мета статті. Головною проблемою у виробничий діяльності гірничодобувних підприємств є створення ресурсозберігаючої технології експлуатації родовища. Також слід підкреслити, що розв'язання цієї проблеми визначає не тільки екологічний стан довкілля гірничих підприємств, але й суттєво впливає на економічні результати їх господарювання. З розширенням масштабів експлуатації природних ресурсів і посиленням деструктивних змін довкілля виникає необхідність пропорційного, наростаючого витрачання коштів і матеріальних засобів на екологічні цілі. Протиріччя екологічних та економічних інтересів підприємств гірничодобувної галузі обумовлені об'єктивними чинниками – обмеженістю природних ресурсів та недосконалістю сучасних виробничих технологій експлуатації родовища корисної копалини.

Тому *мета статті* полягає в узагальненні вихідних даних, що впливають на ухвалення рішення щодо технології відпрацювання кар'єрного поля, методичному обґрунтуванні критеріїв оцінювання еколого-економічної ефективності цих рішень та розробці алгоритму аналізу впливу вихідних даних на ефективність технології видобування корисної копалини у світлі сьогоднішнього стану навколишнього середовища.

Основні результати. Негативний вплив гірничодобувних підприємств на навколишнє природне середовище підтверджується переконливо практичними результатами відкритих гірничих розробок. У систематизованому виді вихідні дані цього впливу стосовно горизонтальних кар'єрних полів представляють собою такі групи визначень:

- умови залягання родовища корисної копалини;

- спосіб розкриття кар'єрного поля (траншеями залежно від їх форми та місця розташування в кар'єрі);
- система розробки родовища (*безтранспортна, транспортно-відвальна, транспортна, комбінована);*
- комплекс технологічного устаткування (*виймально-відвальний, екскаваторно-відвальний, екскаваторно-транспортно-відвальний)*;
- напрям гірничотехнічної рекультивації (*сільськогосподарський, лісогосподарський, водогосподарський, санітарно-гігієнічний, рекреаційний*).

Вихідні дані про умови відпрацювання кар'єрного поля узагальнено на прикладі експлуатації Нікопольського марганцеворудного родовища. Західна частина його геологічної структури відробляється кар'єрами Покровського ГЗК. Вона характеризується такими показниками: потужність наносів – 35-75 м, розкривні породи в середньому вміщують 20% суглинків, 65% глини та 15% пісків і вапняку. Піски та вапняк складають покрівлю рудного пласта, а рудний пласт, в свою чергу, вміщує піщано-глинисту масу. Довжина фронту розкривних робіт на кар'єрах складає 1800-2200 м. Розробка розкривних порід при горизонтальному заляганні покладу корисної копалини та за вищеназваних умов здійснюється за транспортно-відвальною, транспортною або безтранспортною технологічною схемою за допомогою роторних комплексів, системи стрічкових конвеєрів та екскаваторів типу ЭШ.

На кар'єрах ПГЗК, які видобувають окисну марганцеву руду, застосовують комбіновану систему розробки розкривних порід трьома уступами (рис. 1). Верхній (передовий) уступ висотою до 32 м розробляється за транспортною системою роторним комплексом (SRs-2400+VR). Розкривні породи переміщують та складують у відвал стрічковими конвеєрами КЛ-2000 та консольним відвалоутворювачем ОШР. Проміжний (середній) уступ висотою 23-27 м розроблюють за транспортно-відвальною системою, де використовують роторний екскаватор ЭРШР-5250, перевантажувач ПГ та консольний відвалоутворювач ОШР, який розміщує породи розкриву у внутрішній відвал. Нижній (надрудний) уступ висотою 20-22 м переміщують у відвал за ускладненою безтранспортною схемою крокуючими екскаваторами типу ЭШ-15/90 або ЭШ-20/90. Ця схема передбачає кратну переекскавацію розкривних порід у виробленому просторі кар'єру. При цьому, для звільнення видобувного уступу від навалу породи, її певний обсяг переміщують та укладають в нижній та верхній яруси відвалу.

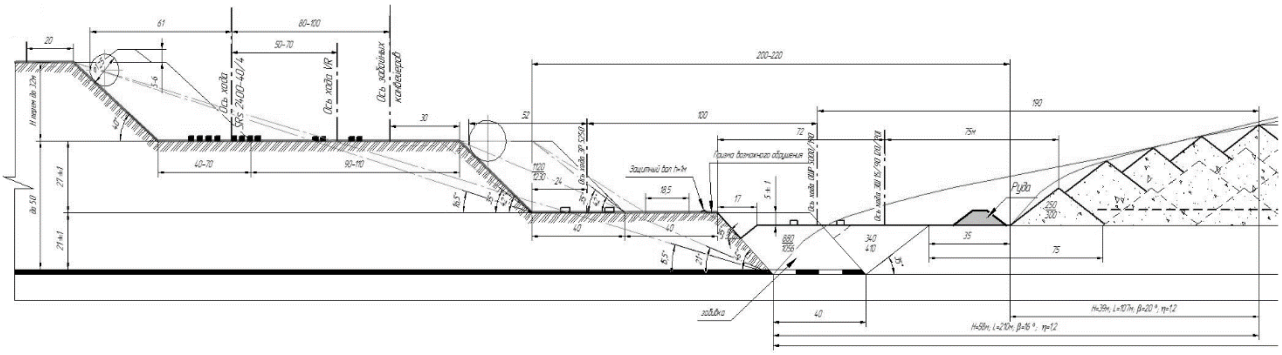

Рис. 1. Технологічна схема розробки кар'єру Чкаловський-2

Представлена технологічна схема відроблення розкривних порід відповідно до сучасних умов експлуатації кар'єрів має недоліки:

1) висока вартість транспортування розкривних порід з верхнього уступу стрічковими конвеєрами, наявність складних робіт по пересуванню забійних і відвальних конвеєрів;

2) велика кількість використовуваного устаткування, яке при змінному (зниженому) попиті на руду простоює;

3) жорсткий взаємозв'язок розкривних комплексів устаткування між собою у просторі та часі;

4) підвищене збіднення руди внаслідок складності виїмки її з-під завалу розкривних порід і складування на передвідвалі.

У результаті порушення послідовності нанесення верхнього й перехідного горизонтів ґрунтів на спланована ділянку знижується якість рекультивованих земель. Значна частина змін природного середовища припадає на ландшафтні порушення, що включають формування відвалів гірських порід і виробок у зоні видобувних робіт. Збагачувальні й агломераційна фабрики, а також інші джерела є основним джерелом забруднення повітряного басейну шкідливими речовинами. У результаті виробничої діяльності на ПГЗК утворюються відходи розкривних порід в обсязі 140-150 млн $м^3$ у рік, хвостів збагачення – 3-3,5 млн $м^3$ із вмістом марганцю 10-12%, які складуються у шламосховище. Виділення пилу з робочої поверхні відвалів та їхніх укосів щорічно призводить до 1200-1250 т його накопичення.

Найбільш екологічною є технологія гірничих робіт, при якій застосовують роторні екскаватори в комплексі зі стрічковими конвеєрами. Найгіршим по обсягах виділення шкідливих домішок є варіант комбінації екскаваторів-мехлопат з автосамоскидами та бульдозерами. У технологічному аспекті важливим завданням є утворення й впровадження сприятливих умов збереження площ земель і обсягу чорнозему на кар'єрах, які сприяли б повному відновленню порушених земель. За багатьма дослідженнями, зберігати землі для сільськогосподарського виробництва потрібно прагнути не тільки й не стільки за допомогою рекультивації порушених земель, скільки запобіганням їх порушення шляхом зміни технології гірничих робіт і оптимізації параметрів за критеріями раціонального землекористування.

Критеріями оптимальності вибору доцільної за еколого-економічною оцінкою технології відпрацювання родовища можуть бути:

1) мінімум витрат на видобування й перероблення рудної сировини в проектному контурі відпрацювання запасів у кар'єрному полі;

2) максимум вилучених запасів рудної сировини (мінімум втрат експлуатаційних запасів родовища);

3) мінімум обсягу виробничих відходів і викидів шкідливих речовин у навколишнє природне середовище.

Підприємство може мати одночасно кілька цілей згідно з критеріями оптимальності і відповідно до них ухвалювати свою виробничо-господарську діяльність. Розглянемо детальніше наведені вище критерії оптимальності.

Мінімум витрат на видобуток і переробку (збагачення) рудної сировини вимірюється собівартістю $B_{кti}$ виробництва концентрату. Ця собівартість включає витрати $B_{∂t}$ на видобування марганцевої руди в кар'єрі та її транспортування на збагачувальну фабрику. Протягом часу експлуатації кар'єру витрати на видобування руди збільшуються, з одного боку, внаслідок дії фактору часу, з іншого, – через зношування технологічного устаткування та погіршення умов його експлуатації. Також змінюються витрати на розкривні роботи та збагачення руди. У такому разі стосовно умов видобування руди на *i*-му кар'єрі в в *t*-му році з початку етапу його роботи, що розглядається, маємо:

$$B_{\text{кіt}}(Mn_{pi}, Mn_{ki}) = \left[\left(B_{\text{діt}} + B_{\text{піt}}\right)\frac{Mn_k}{Mn_{\text{рі}}\varepsilon} + B_{\text{зіt}}\right]\frac{O_{pi}Mn_{pi}}{Mn_k\varepsilon} + IB_{it} + OC_{it}, \text{ грн./рік}, \qquad (1)$$

де: $B_{kit}(Mn_{pi}, Mn_{ki})$ – витрати на виробництво концентрату залежно від вмісту марганцю в концентраті Mn_{ki} та в рудній сировині Mn_{pi}, %, на *i*-му кар'єрі;

$B_{∂it}, B_{nit}, B_{зit}$ – витрати на видобування безпосередньо марганцевої руди, розкривні роботи та збагачення руди, відповідно;

$$B_{∂it}=\left[(C_{\text{ді}}(1+tK_{\text{ді}})(1+K_ч)^{t-1}\right], \text{ грн./т};$$
$$B_{nit}=\left[\sum_{j=1}^{n} C_{nij}\frac{H_{\text{yіt}}}{m_{\text{рit}}}(1+tK_{ni})(1+K_ч)^{t-1})\right], \text{ грн./т};$$
$$B_{зit}=[\sum C_{\text{зі}}(1+tK_з)(1+K_ч)^{t-1}], \text{ грн./т};$$

де: $C_{∂i}$ – собівартість безпосередньо видобування 1т руди на *i*-му кар'єрі, грн.; $K_{∂i}, K_{ni}$ – підвищення витрат унаслідок зношування технологічного устаткування та погіршення умов його експлуатації, відповідно, на видобування руди та розроблення розкривної породи, частка од.; $K_ч$ – підвищення витрат на гірничотранспортні роботи під впливом фактору часу видобування руди, часка од.; C_{nj} – собівартість розроблення 1 м³ розкривних порід на *j*-му уступі *i*-го кар'єру, грн./м³; H_{yjt}, m_{pit} – відповідно, висота *j*-го уступу та потужність рудного пласту на *i*-му кар'єрі, м; n – загальна кількість розкривних уступів на кар'єрі; $C_{зi}$ – собівартість збагачення руди з *i*-го кар'єру для виготовлення 1 т концентрату, грн./т; ε_i – коефіцієнт вилучення Mn_{pi} в концентрат з руді *i*-го кар'єру, частка од.; IB_{it}, OC_{it} – обсяг інвестиційних вкладень, спрямованих, відповідно, на розвиток техніки й технології гірничо-збагачувального виробництва та на охорону середовища, грн./рік; O_{pit} – плановий обсяг видобутку марганцевої руди на *i*-му кар'єрі в t-му році, т/рік.

За формулою (1) враховується, що масив розкривних порід при горизонтальному заляганні рудного пласту розділяють на уступи (частіше 2-3) та відпрацьовують різним технологічним устаткуванням. Тому для точнішого розрахунку собівартості концентрату розглядаємо окремо умови гірничих робіт на кожному *i*-му кар'єрі та *j*-му розкривному уступі. Розрахунок здійснюється за алгоритмом, наведеним на рис. 2.

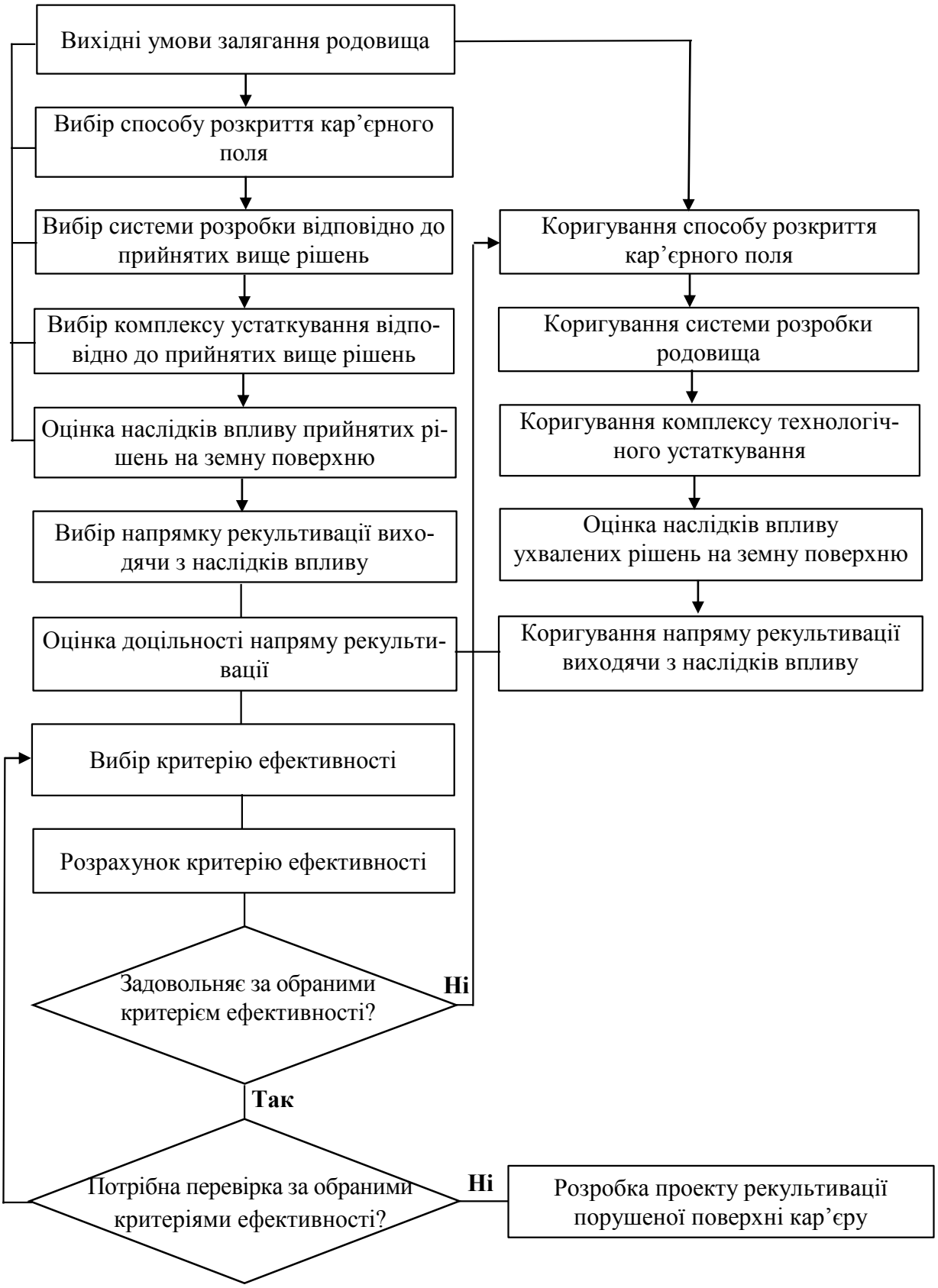

Рис. 2. Алгоритм системного аналізу факторів, що впливають на вибір технологічного комплексу відпрацювання горизонтального родовища

Прийнятий порядок розрахунку передбачає системний аналіз факторів, що

впливають на вибір технології гірничих робіт при відпрацюванні горизонтального родовища. Для наближеного оцінювання впливу факторів зношування кар'єрного устаткування та погіршення умов його експлуатації, а також часу видобування руди можуть бути використані графічні залежності, подані на рис. 3. Коефіцієнт вилучення марганцю в концентрат є встановлюється за даними практики збагачувальної фабрики (рис. 4).

У відходах збагачення, що спрямовуються у хвостосховище, втрачається певний обсяг металу (марганцю). На величину цього обсягу в основному впливає графік виходу концентрату з сирої руди. Дослідимо цей висновок на прикладі кар'єрів ПГЗК.

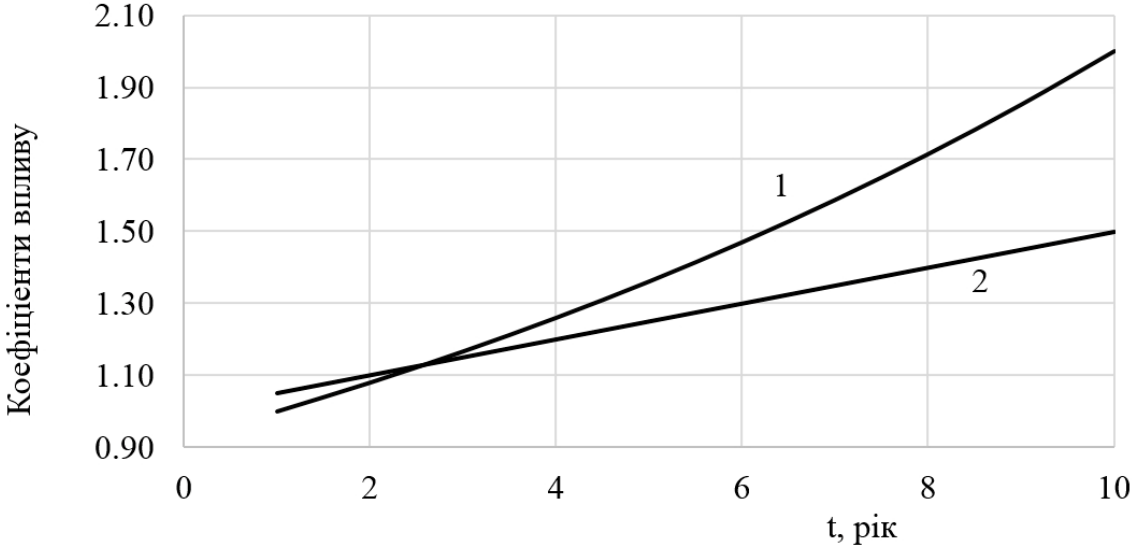

Рис. 3. Графіки, що відображають зміну витрат на виробництво марганцевого концентрату під впливом фактору часу $K_ч$ та унаслідок зношування технологічного устаткування й погіршення умов його експлуатації $K_{∂i}$ і $K_{пі}$, частка од.; 1 – $(1+K_ч)^{t-1}$, 2 – $(1+K_{нт})$

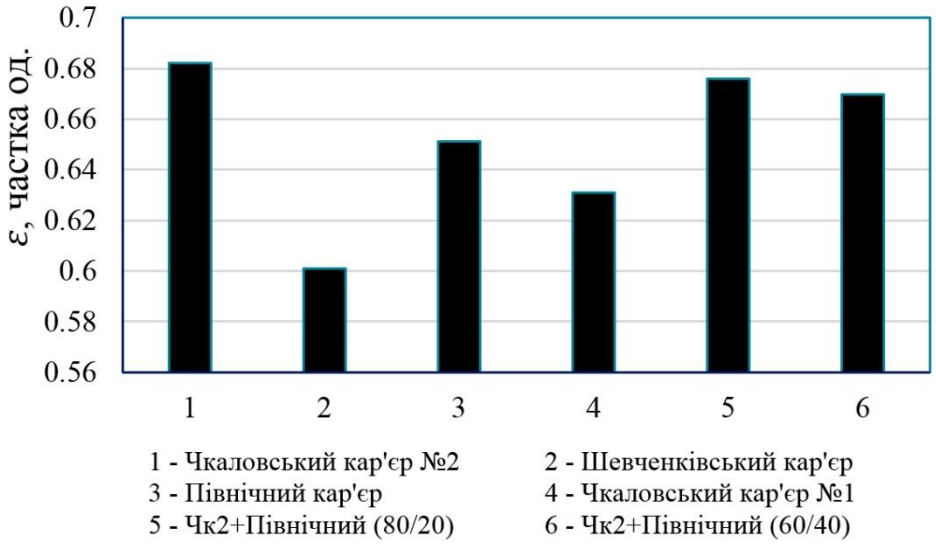

Рис. 4. Статистичні оцінки коефіцієнту вилучення марганцю в концентрат, виготовленого з руди різних кар'єрів ПГЗК, частка од.

Досліджена еколого-економічна ефективність технології експлуатації марганцеворудного пласта на Шевченківському, Північному і кар'єрах Чкаловський-1 та Чкаловський-2. На кар'єрах застосовується однотипне устаткування, яке експлуатується в різних гірничотехнічних умовах (табл. 1).

Передусім, за формулою (1) розраховані сумарні витрати на виробництво концентрату. Для спрощення розрахунків розглядаються усереднені вихідні дані за практикою роботи Покровського ГЗК. Продуктивність кар'єру по руді визначена виходячи з ринкового попиту на марганцевий концентрат – 12500 т на місяць (для річної продуктивності – 600 тис. т). За результатами розрахунків, майже однакові (з різницею 2-3%) витрати на видобування й перероблення рудної сировини спричинені експлуатацією гірничотранспортного устаткування на Північному і Чкаловському-1 кар'єрах, а також на Шевченківському та Чкаловському-2 кар'єрах (рис. 5). Причому, перші кар'єри порівняно з другими обумовлюють значно вищі (на 14-18%) витрати.

Таблиця 1

Технологічна характеристика кар'єрів Покровського ГЗК

Кар'єр	Проектна потужність, тис. т/рік	Уступ	Висота уступу, м	Технологічне устаткування
Чкаловський-2	1200	верхній	26	SRs2400+ A_2R_s-8800/110
		основний	27,5	ЭР-5250 + ОШР-5000/190
		надрудний	22	ЭШ-15/90 – 3 од.
Північний	1400	верхній	26,2	SR_s-2400 + A_2R_s-8800/110
		основний	28,1	SR_s-2400 + A_2R_s-8800/180
		надрудний	17	ЭШ-20/90+ЭШ-15/90+ЭШ-10/70
Шевченківський	1200	верхній	14,1	ЭРШР-5000 + A_2R_s-8800/110
		основний	26,3	ЭР-5250 + ШР-5000/190
		надрудний	17,2	ЭШ-20/90 + ЭШ-10/70
Чкаловський-1	1000	верхній	25,9	ЭРШР-1600 + A_2R_s-8800/110
		основний	30,1	ЭРШР-5000 + ОШР-5000/190
		надрудний	19	ЭШ-20/90, ЭШ-15/90, ЭШ-20/72, ЭШ-6/45, ЭШ-10/60

Отже, прийняті на Шевченківському та Чкаловському-2 кар'єрах комплекси устаткування та параметри технологічної схеми (передусім, через меншу потужність розкривного масиву) за витратами на виробництво концентрату є більш вигідними, ніж Північний і Чкаловський-1 кар'єри. Тепер оцінимо названі кар'єри виходячи з рівня втрат експлуатаційних запасів родовища.

У відходах збагачення, що спрямовуються у хвостосховище, втрачається певний обсяг металу (марганцю). На величину цього обсягу в основному впливає графік виходу концентрату з сирої руди. Дослідимо цей висновок на прикладі кар'єрів ПГЗК.

Втрати металу у відходах збагачення рудо-потоку *i*-го кар'єру можуть бути визначені за вираженням:

$$Me_i = O_{pi} Mn_{pi}(1-\varepsilon_i), \text{ т/ рік}, \qquad (2)$$

де Mn_{pi}, ε_i – відповідно, вміст марганцю загального в сирій руді *i*-го кар'єру та його вилучення в концентрат, частка од.

Вилучення ε_i приймається за досвідом збагачення рудної сировини, як функція вмісту марганцю в руді. Використовуючи вираження (2) стосовно показників видобутку руди та виробництва концентрату на Покровському ГЗК, розраховані обсяги втраченого металу при різному вмісті марганцю в рудній сировині (табл. 2). Причому прийнято, що той чи інший кар'єр має забезпечувати виробництво однакового обсягу концентрату (12500 т на місяць) згідно з попитом на концентрат.

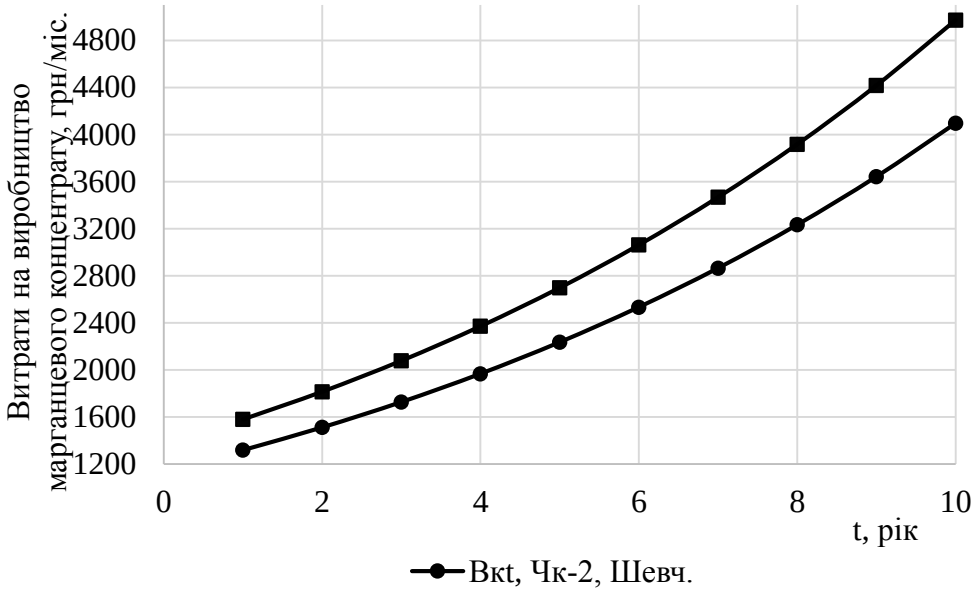

Рис. 5. Графіки залежності сумарних витрат на виробництво марганцевого концентрату, виготовленого з руди різних кар'єрів

Таблиця 2

Показники гірничо-збагачувального процесу на Покровському ГЗК

Кар'єр	Видобуток руди, тис.т/міс.	Вміст марганцю в руді,%	Коефіцієнт вилучення металу	Втрати металу, тис. т/міс.
Чкаловський-1	36,31	23,69	0,63	3,17
Чкаловський-2	29,42	27,03	0,68	2,53
Північний	33,36	24,99	0,65	2,91
Шевченківський	41,36	21,85	0,60	3,60

За статистичними даними збагачувальної фабрики ПГЗК встановлена кореляційна залежність $\varepsilon=f(Mn_p)$. Графік цієї залежності наведено на рис. 6. За графіком видно, що підвищення вмісту марганцю в руді при незначному вмісті (21-25%) не призводить до суттєвого підвищення коефіцієнту вилучення металу в концентрат (від 0,61 до 0,64), у той же час при високому вмісті (28-32%) підвищення вмісту марганцю дозволяє значно підвищити рівень цього вилучення (від

0,68 до 0,76), унаслідок чого досягаються найменші втрати металу. Значить, найменші втрати будуть відбуватися при розподілі видобутку руди на окремі рудо-потоки. Усереднення руди по групах кар'єрів за критерієм ефективності, що розглядається, слід здійснювати так, щоб в одній групі отримати низький, а в другий – високий вміст марганцю в руді.

У проектному контурі кар'єра знаходиться певний обсяг руди та розкривних порід, що підлягають вилученню протягом часу експлуатації родовища. Відношення цих обсягів між собою визначає експлуатаційний коефіцієнт розкриття. Щорічно виробляють обсяг порід, який прямо пропорційний обсягу видобутку та цьому коефіцієнту. У свою чергу, обсяг видобутку обумовлений обсягом концентрату, що має виробляти комбінат згідно з попитом ринку на марганцеворудну продукцію.

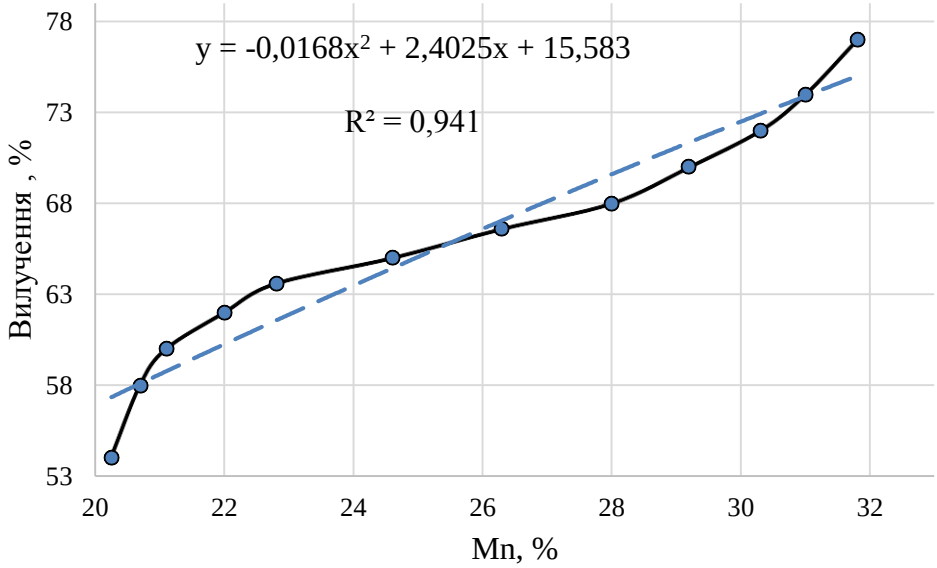

Рис. 6. Статистична оцінка впливу якості рудної сировини на рівень вилучення металу в концентрат

Якщо концентрат виробляється з багатої руди, то обсяг її видобутку знижується (порівняно із середнім обсягом), а значить, скорочується обсяг розкривних порід, який треба було б видалити з кар'єрів для видобування цього обсягу руди середньої якості. У той же час, при виготовленні заданого обсягу концентрату з бідної руди потрібно буде видобувати її більший обсяг, що призведе до підвищення обсягу розкривних порід. Встановимо обсяг цих порід, який може бути скорочений, якщо обсяг річного видобутку буде усереднюватись за якістю руди, що збагачується, шляхом змішування декількох кар'єрних потоків.

За результатами розрахунку (табл. 3) нижча якість марганцевої руди (21,85% *Mn*) призводить до нижчого коефіцієнту вилучення металу (0,60) та найбільших обсягів збагачення руди (41,36 тис. т/міс.), хвостів збагачення (28,86 тис. т/міс.) та розробки розкривних порід (570,8 тис. м^3/міс). Навпаки, вища якість руди дозволяє досягти найкращих показників виробництва концентрату. Змішу-

вання рудної сировини у рівних обсягах для випуску 600 тис.т концентрату показує можливість їх скорочення.

Таблиця 3

Оцінка впливу якості рудної сировини на сумарні витрати для виробництва марганцевого концентрату

Співвідношення обсягів руди (Чк-2/Шевч)	Вміст марганцю, %	Коефіцієнт вилучення металу	Видобуток руди, тис. т/міс.	Хвости збагачення тис. т/міс.	Розкривні породи, тис. м^3/міс
0/100	21.85	0.60	41.36	28.86	570.8
20/80	22.89	0.62	38.39	25.89	552.9
40/60	23.92	0.63	35.76	23.26	536.4
60/40	24.96	0.65	33.42	20.92	521.3
80/20	25.99	0.67	31.31	18.81	507.3
100/0	27.03	0.68	29.42	16.92	494.3

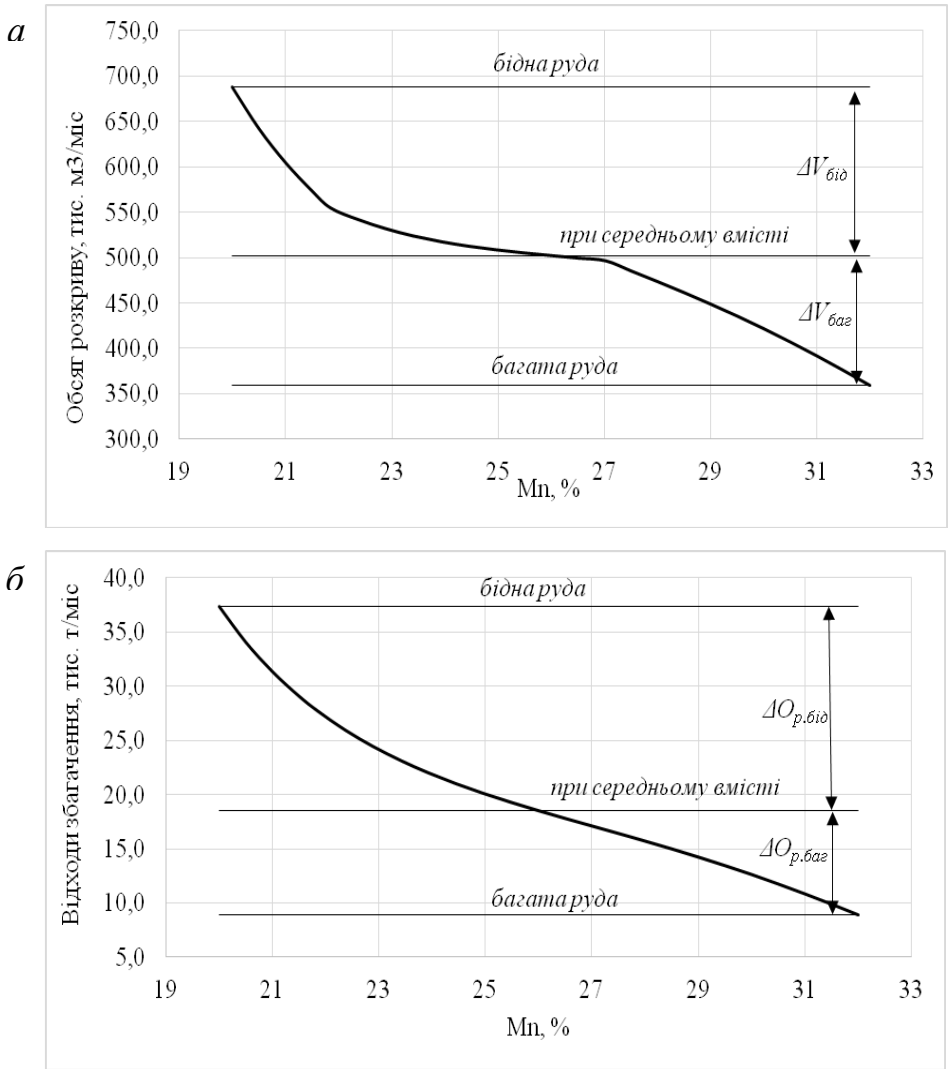

Рис. 7. Графіки зміни обсягів розкривних порід *(а)* та відходів збагачення *(б)* в залежності від вмісту марганцю в кар'єрному рудо-потоці

Якщо треба виробити згідно з попитом обсяг концентрату $O_{кп}$, то для цього слід видобути обсяг руди $O_{рп}$. При поділі всього обсягу руди, що видобувають декілька кар'єрів, кожен з них має забезпечити рудну сировину в обсязі $O_{рі}$. Виходячи з цього обсягу руди, *і*-й кар'єр має розробити відповідний обсяг розкривних порід $V_{пі}$. У такому разі буде виконуватися умова:

$$V_{пі} = O_{рі}K_{рі} = O_{кі}\beta_i K_{рі}, \text{ м}^3/\text{міс. (рік)}, \qquad (3)$$

де: $K_{рі}$ – коефіцієнт розкриття при видобуванні руди на *і*-му кар'єрі, м^3/т; β_i – витрата руди *і*-го кар'єру на 1 т концентрату, т.

Вираження (3) дозволяє планувати коефіцієнт розкриття рудного пласта згідно з якістю його рудної сировини. Як витікає з цього вираження, обсяг розкривних порід можна регулювати зміною виходу концентрату β_i з сирої руди *і*-го кар'єру за рахунок її якості – від бідної руди до багатої відносно усередненої. Зниження чи перевищення сумарного обсягу розкриву $\Delta V_{\text{п}}$, який треба видалити з кар'єру для видобування заданого обсягу руди $O_{\text{р}}$ і виробництва концентрату $O_к$, встановлюється виходячи з суми обсягів розкривних порід, що забезпечують видобування обсягів усіх кар'єрних рудо-потоків.

Розглянуто ефективність запропонованого рішення щодо збагачення заданого обсягу руди за окремими рудо-потоками, виходячи з обсягів розкривних порід та відходів (рис 7). При цьому досліджено два рудо-потоки, що за вмістом марганцю в руді суттєво відрізняються між собою (бідного – 20% та багатого – 32%, у середньому – 26%). Якщо вміст підвищується з 20% до 26%, то необхідний обсяг розкриву зменшується на 185 тис. м^3/міс., а при зниження вмісту з 32% до 26% – збільшується на 140 тис. м^3/міс. (рис. 7, *а*). Аналогічним чином змінюються місячні обсяги відходів збагачення: 19 тис. т і 10 тис. т (рис. 7, *б*). Ці результати розрахунку свідчать про доцільність роздільного збагачення багатого та бідного рудо-потоків.

Висновки. 1. Протиріччя екологічних та економічних інтересів підприємств гірничодобувної галузі обумовлені обмеженістю природних ресурсів та недосконалістю сучасних технологій експлуатації родовища. Шляхи зниження впливу відкритих розробок на обсяги використання природних ресурсів ґрунтуються на обмеженні цих обсягів, яке передбачає оптимізацію виробничої потужності технологічного комплексу гірничих робіт за еколого-економічними критеріями ефективності з урахуванням етапу експлуатації кар'єру.

2. Узагальнено вихідні дані про гірничо-геологічні та технологічні умови й практичні результати відпрацювання кар'єрного поля на прикладі експлуатації Нікопольського марганцеворудного родовища, а також розроблений алгоритм оцінювання ефективності технології видобування корисної копалини з урахуванням впливу зазначених даних. В аналітичному виді визначені витрати на видобування й перероблення рудної сировини, втрати її експлуатаційних запасів та металу, що вони містять, обсяг розкривних порід, причому враховано зміну названих критеріїв оцінки протягом певного етапу експлуатації родовища.

3. За результатами розрахунків, майже однакові (з різницею 2-3%) витрати на

виробництво марганцевого концентрату спричинені експлуатацією комплексів розкривних робіт на Північному і Чкаловському-1 кар'єрах, а також на Шевченківському та Чкаловському-2 кар'єрах, причому, перші кар'єри порівняно з другими обумовлюють значно вищі (на 14-18%) витрати. Це свідчить про те, що на кар'єрах другої групи комплекси устаткування та параметри технологічної схеми краще підходять до умов експлуатації. На Шевченківському кар'єрі несприятливим є знижений вміст марганцю в сирий руді (21,85%) та збільшений обсяг металу у відходах збагачення (3,60 т на місяць), а також найбільший обсяг розкривних робіт (570,8 тис. м^3), що частково компенсується зниженою потужністю розкривного масиву (57,6 м).

4. Встановлено, що підвищення вмісту марганцю в руді при незначному вмісті не призводить до суттєвого підвищення коефіцієнту вилучення металу в концентрат, а при високому вмісті його підвищення дозволяє значно підвищити рівень цього вилучення. З метою зниження обсягу металу у відходах збагачення видобуток руди та усереднення її якості по групах кар'єрів слід розподіляти на два рудо-потоки так, щоб в одній групі був отриманий низький, а в другий – високий вміст марганцю в руді. Якщо рудну сировину збагачувати роздільними (бідною і багатою) потоками, то необхідний обсяг розкриву зменшується на 45 тис. м^3 /міс., а обсяг відходів збагачення скорочується на 9 тис. т/міс.

5. На збагачувальних фабриках Покровського ГЗК концентрат виробляють з рудної сировини усередненої якості. Результати викладених вище досліджень авторів вказують на еколого-економічну доцільність роздільного збагачення рудо-потоків. Безумовно, ця доцільність потребує більш детальних обґрунтувань, на що варто спрямувати подальші дослідження.

Перелік посилань

1. Сивий, М., Паранько, І., & Іванов, Є. (2013). *Географія мінеральних ресурсів України*. Львів: Простір М.
2. Іванов Є.А., & Біланюк В.І. (2017). Проблеми рекультивації і ревіталізації земель, порушених гірничими роботами. *Четверта міжнародна науково-практична конференція "Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування" Україна*. 262-270.
3. Собко Б.Ю. (2010). Обґрунтування раціональних технологічних схем розробки розсипних родовищ України. *Геотехнічна механіка*, (91), 211-217.
4. Собко Б.Ю., & Лазніков О.М. (2015). Обґрунтування способу розробки Мотронівсько-Аннівської ділянки Малишевського титано-цирконієвого родовища. *Геотехнічна механіка*, (124), 232-238.
5. Гриценко Л.С. (2011). Визначення раціональних енерго- та еколого-зберігаючих технологічних схем в кар'єрах нерудних корисних копалин. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування, Серія «Технічні науки»*, (2 (54)), 165-171.
6. Романенко О.В. (2005). Обґрунтування раціональних областей застосування способів формування внутрішнього відвалу по економічній ефективності. *Екологія і природокористування*, (8), 109-112.
7. Siña, M., & Guzmán, J. I. (2019). Real option valuation of open pit mines with two processing methods. *Journal of Commodity Markets, 13*, 30–39. https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2018.05.003
8. Nabiollah Adibi, Majid Ataee-pour, Mehdi Rahmanpour. (2015). Integration of sustainable development concepts in open pit mine design. *Journal of Cleaner Production*, (108 (Part A.)), 1037-1049. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.150

9. Morteza Paricheh, Morteza Osanloo. (2017). A simulation-based framework for estimating probable open-pit mine closure time and cost. *Journal of Cleaner Production*, (167), 337-345. https://doi.org/10.1201/9781315166582-7
10. M. Nehring M., Cheng X. (2016). An investigation into the impact of mine closure and its associated cost on life of mine planning and resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, (127), 228-239. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.162
11. Evren Deniz Yaylacı, H. Şebnem Düzgün. (2017). Evaluating the mine plan alternatives with respect to bottom-up and top-down sustainability criteria. *Journal of Cleaner Production*. (167), 837-849. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.248
12. Ryan C. Goodfellow, Roussos Dimitrakopoulos. (2016). Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty. *Applied Soft Computing*, (40), 292-304. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.038
13. Shiv Prakash Upadhyay, Hooman Askari-Nasab. (2018). Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, (28 (2)), 153-166. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.003
14. Xiao-chuan XU, Xiao-wei GU, Qing WANG, Jian-ping LIU, Jun WANG. (2014). Ultimate pit optimization with ecological cost for open pit metal mines. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, (24 (5)), 1531-1537. https://doi.org/10.1016/s1003-6326(14)63222-2
15. Xiao-chuan Xu, Xiao-wei Gu, Qing Wang, Xian-wen Gao, Jian-ping Liu, Zong-kang Wang, Xun-hong Wang. (2018). Production scheduling optimization considering ecological costs for open pit metal mines. *Journal of Cleaner Production*, (180), 210-221. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.135

АННОТАЦИЯ

Цель. Обобщение исходных данных, влияющих на принятие решения о выборе технологии отработки карьерного поля, методическое обоснование критериев оценки эколого-экономической эффективности этих решений и разработка алгоритма анализа влияния исходных данных на эффективность технологии добычи полезных ископаемых при современном состоянии окружающей среды.

Методика исследования заключается в обзоре и систематизации подходов по выбору технологии открытой разработки месторождения полезных ископаемых, методическом обосновании критериев анализа и оценке факторов, влияющих на эколого-экономическую эффективность технологических комплексов отработки месторождения в рыночных условиях хозяйствования.

Результаты исследования. Разработан алгоритм оценки эффективности технологии добычи полезных ископаемых с учетом влияния горно-геологических, технологических условий и практических результатов отработки карьерного поля. Рассчитаны затраты на добычу и переработку рудного сырья, потери ее эксплуатационных запасов и металла, содержащегося в рудном сырье, а также объем вскрышных пород, причем учтено изменение перечисленных критериев оценки в течение определенного этапа эксплуатации горизонтального месторождения. Результаты исследований авторов указывают на эколого-экономическую целесообразность раздельного обогащения марганцевой руды (разного качества и содержания марганца), поступающей с карьеров.

Научная новизна. Установлено, что повышение содержания марганца в руде при незначительном его содержании не приводит к существенному повышению коэффициента извлечения металла в концентрат, а при высоком содержании его повышение позволяет значительно повысить уровень этого извлечения. С целью снижения объемов металла в отходах обогащения

добычу руды и усреднение ее качества по группам карьеров следует распределять на два рудопотока так, чтобы в одной группе было получено низкое, а во второй – высокое содержание марганца в руде.

Практическое значение. Рассмотрены экологические и экономические интересы горнодобывающих предприятий в спектре ограниченных объемов природных ресурсов и современных технологий добычи и переработки рудного сырья. Предложены пути снижения влияния открытых горных работ на объемы использования природных ресурсов, которые основываются на оптимизации производственной мощности комплекса горных работ согласно этапу эксплуатации карьера по эколого-экономическим критериям эффективности.

Ключевые слова: *Технология открытой разработки месторождения, эколого-экономическая эффективность, недропользование, горнотехническая рекультивация, карьер, марганцевая руда, качество рудного сырья.*

ABSTRACT

Purpose. Generalization of basic conditions influencing decision-making for choosing the technology for development of open pit field, methodological substantiation of criteria for assessing the ecological and economic efficiency of these decisions and the development of the algorithm for analyzing of basic conditions that influence mining technology efficiency according to current state of the environment.

The methodology is concluded in reviewing and systematizing of approaches to a choose a surface mining technology of a mineral deposit, methodical substantiation of analysis criteria and an assessment of factors that influence ecological and economic efficiency of technological complexes for mineral deposit development in market conditions.

Findings. The algorithm of efficiency assessment of mining technology taking into account the influence of mining and geological, technological conditions and practical results of the development of open pit mining, was developed. The costs for the development and dressing of ore, losses of its operational reserves and metal contained in the ore, as well as the volume of overburden, were calculated in consideration of changing of aforementioned evaluation criteria during a certain stage of operating of a flat deposit. Ecological and economic feasibilities of separate dressing of manganese ore coming from open pits with a different quality and content of manganese are stressed in results of the authors' research.

The originality. It’s determined that increasing of the content of manganese in the ore with its insignificant content does not lead to a significant increase of the extraction factor of a metal into a concentrate, and with a high content of its increasing allows noticeably to raise the level of this extraction. In order to reduce the volume of metal in dressing wastes, the development of ore and averaging of its quality according to open pit groups should be divided into two ore flows so that low manganese content in the ore is received in one group and high manganese content is done in the other one.

Practical implications. The environmental and economic interests of mining enterprises in the spectrum of limited volumes of natural resources and modern technologies for the development and dressing of ore are considered. The ways of reducing the impact of open pit mining on the volume of the use of natural resources which are based on the optimization of production capacity of a complex of mining operations according to the stage of exploitation of an open pit by ecological and economic efficiency criteria, are proposed.

Keywords: *Technology of open-pit mining, environmental and economic efficiency, subsoil use, reclamation, open pit, manganese ore, ore quality.*