

Evaluation of the production processes of a mining and processing enterprise

Andrii Cherep^{1*}, Dar'ya Pilova¹

¹*Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

*Corresponding author: cherep.a.yu@nmu.one

Abstract. Technological advance of a mine with regard to ecological and economic evaluation takes shape as a generalized model of activities aimed at higher profit return, increased extraction of mineral resources from the subsoil, cut-down cost of mining and processing, and at reduced waste and harmful emission. The authors assess the open pit mining efficiency as a function of concentrate production cost as a case-study of Pokrovsky GOK, Ukraine. Statistical correlation of the production technology and economy and the produced ore flow quality is determined. A blending procedure is proposed for manganese ore from two groups of open pits to ensure the largest extractability of the useful component at the minimum cost of stripping. Preset quality ore should be accumulated at a processing plant for the concentrate production, with follow-on re-adjustment of the process circuits to ore with another content of metal. Free market economy has a material effect on production performance in the mining and processing industry, first of all, on the volume of products sold.

Keywords: *open pit, manganese ore, ore flow quality, technology and economy efficiency, metal recovery, concentrate cost*

Оцінка виробничих процесів гірничо-збагачувального підприємства

Андрій Череп¹, Дар'я Пілова¹

¹*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна*

*Corresponding author: cherep.a.yu@nmu.one

Анотація. Технологічний прогрес гірничого підприємства з точки зору еколого-економічної оцінки наданий як узагальнена модель діяльності, що направлена на підвищення дохідності, збільшення видобутку корисних копалин з надр, зниження витрат на видобуток та переробку корисних копалин, зниження викидів та відходів. На прикладі Покровського ГЗК, Україна, автори оцінюють ефективність відкритих гірничих робіт в залежності від собівартості виробництва концентрату. Визначений статистичний взаємозв'язок технології та економіки видобутку з якістю рудопотоку, що видобувається. Запропонована процедура змішування марганцевої руди з двох груп кар'єрів для забезпечення максимального вилучення корисного компоненту при мінімальних витратах на розкривні роботи. Руда заданої якості повинна накопичуватись на збагачувальній фабриці для виробництва концентрату з послідовним переналаштуванням технологічних схем на руду з іншим вмістом металу. Вільні ринкові відносини суттєво впливають на виробничі показники в гірничодобувній та переробній промисловості, в першу чергу на об'єм продукції, що реалізовується.

Ключові слова: *кар'єр, марганцева руда, якість рудопотоку, технолого-економічна ефективність, вилучення металу, собівартість концентрату*

1. Вступ

У проектах відкритої розробки родовищ певні обмеження використання природних ресурсів зазвичай не розглядаються. Цей напрямок може бути реалізований без зниження обсягів випуску та збільшення витрат, адже це передбачає раціональний розподіл цих

обсягів з урахуванням технологіко-економічних факторів, що визначають ведення виробничих процесів за умови обмеження природних ресурсів. На сучасному етапі наукові дослідження з питань еколого-економічних способів розкриття та систем розробки родовищ корисних копалин не висвітлюють питання технологічної ефективності. Розробка родовищ ґрунтується головним чином на традиційних, добре апробованих технологіях гірничих робіт. Ці технології передбачають, перш за все, видобуток найбільшого обсягу корисних копалин. Хоча останнім часом вчені демонструють підвищену науково-прикладну зацікавленість в економіко-математичному обґрунтуванні технологічних рішень стосовно різних етапів відпрацювання родовища – від будівництва до ліквідації гірничого підприємства.

Вирішення проблеми ефективності гірничо-збагачувального виробництва визначає не лише раціональне використання природних ресурсів, а й суттєво впливає на економічні результати діяльності підприємства. Названі особливості визначають вимоги та обмежують вихідні умови виробництва, саме вони формують фактори впливу на технологічну ефективність виробництва металургійної сировини.

Розвиток технології гірничого підприємства з погляду еколого-економічної оцінки виробничих процесів формується як узагальнена модель дій, спрямованих на підвищення обсягу прибутку підприємства, рівня вилучення запасів з надр, зниження витрат на видобуток та збагачення руди, зниження обсягу відходів та викидів шкідливих речовин. Зазначимо наукові роботи, пов'язані з вирішенням вищезазначеної проблеми.

Насамперед, слід назвати результати досліджень Шапаря А.Г. та Четверика М.С., які багато в чому вирішують питання технологічного зниження впливу відкритих гірничих робіт на обсяги порушення природного довкілля. У публікації [1] пропонується застосування технологічної номограми оперативного планування обсягів видобувних та розкривних робіт у кар'єрі за мінімізації площі земельного відведення. При цьому виключається зовнішнє відвалоутворення, суттєво скорочуються обсяги рекультиваційних робіт. У статті [2] викладено дослідження щодо вирішення актуальної проблеми охорони природних ресурсів. Розроблено технологію попереднього збагачення руди в кар'єрі, що дозволяє зменшити її втрати та якість, вилучення позабалансових запасів та підвищити потужність гірничого підприємства.

З метою адаптації гірничо-збагачувального підприємства до ринкових умов реалізації продукції необхідно здійснити його принципове удосконалення у напрямі забезпечення обсягів [3], якості та собівартості продукції ринкового попиту (реконструкція підприємства, його технічне переозброєння, консервація окремих підрозділів). У науковій роботі [4] запропоновано структуру двовимірної гіпотетичної моделі геологічного блоку для планування параметрів гірничих робіт, що дозволяє скласти систему моделювання робочої зони кар'єру та визначити ймовірні терміни та витрати на його закриття. Показники життєзабезпечення з цієї проблеми оцінюються та порівнюються за критеріями стабільності місцевих жителів та керівних осіб, які приймають рішення [5]. Тому критерії слід розглядати для запобігання необґрунтованим діям у контексті сприяння сталому розвитку на місцевому рівні.

Запропоновано реальну модель опціону для оцінки вартості видобутку рудної сировини відкритим способом в умовах невизначеності її ринкової ціни [6]. Модель дозволяє максимізувати чисту наведену вартість видобувного комплексу, виходячи з послідовності та швидкості вилучення рудних запасів.

Наведено глобальну оптимізацію гірничодобувних комплексів, спрямовану створення графіка гірничих робіт щодо різних кар'єрів і технологічних схем при максимізації економічної цінності підприємства у цілому [7]. Викладений методичний підхід до планування гірничих робіт на основі точніших прогнозів відхилень параметрів виробничих

процесів у кар'єрі від початкових планів призводить до кращого прогнозування з мінімальними втратами [8].

Для проектування кар'єру важливе значення мають кількісні оцінки екологічних витрат при видобутку корисних копалин. У цьому аспекті представлений метод планування графіка гірничих робіт з безпосереднім урахуванням прямих екологічних витрат [9].

2. Методика проведення досліджень

У розглянутих публікаціях недостатньо розроблені методичні засади економічного обґрунтування факторів, що впливають на технологічну ефективність комплексів гірничих робіт у кар'єрах. Через слабку адаптацію до кон'юнктури ринку, невідповідність технологічних схем гірничих робіт економічним вимогам експлуатації родовища деякі гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК) суттєво знизили обсяги видобутку. Сьогодні впровадження нових гнучкіших технологій, що відповідають вимогам ринку металургійної сировини, є однією з головних складових проблеми успішної роботи гірничих підприємств.

Загалом, технологічна ефективність розробки горизонтальних родовищ, на думку авторів, ґрунтується на рішеннях, які відповідатимуть таким умовам [10]:

1) видобувні роботи на кар'єрі здійснюються відокремленим уступом, для транспортування руди використовують навантажувачі або автосамоскиди;

2) технологічна схема гірничих робіт забезпечує поперечне переміщення розкривних порід у відвал (без використання конвеєрної доставки);

3) комплекс устаткування забезпечує видобуток рудної сировини в обсязі, що відповідає ринковому попиту.

Вирішення питань, пов'язаних з визначенням факторів впливу на обсяги використаних кар'єром природних ресурсів є важливим для розробки загальної концепції вибору методів ресурсозбереження та, за відсутності достатньої інформації в наукових публікаціях у цьому напрямі, вимагає подальшого методичного обґрунтування.

3. Результати та обговорення

Для марганцевих кар'єрів ПГЗК, що відпрацьовують горизонтальні родовища, раціональною є технологічна схема розробки розкривних порід трьома уступами за безтранспортною (надрудний уступ) та транспортно-відвальною системами (передовий та проміжний уступи). Передовий (верхній) уступ розробляють роторним комплексом (SRs-2400 + VR), розкривні породи переміщують і складають у відвал конвеєром КЛ-2000 та відвалоутворювачем ОШР. Для відпрацювання проміжного (основного) уступу застосовують роторний екскаватор ЕРШР-5250, перевантажувач ПГ та відвалоутворювач ОШР. Нижній (надрудний) уступ переміщують у відвал крокуючими екскаваторами типу ЕШ-15/90 або ЕШ-20/90.

Представлена технологічна схема відпрацювання розкривних порід достатньо відповідає сучасним вимогам експлуатації горизонтального родовища, проте з точки зору забезпечення конкурентних переваг виробленого концентрату має недоліки відповідно до таких причин:

1) висока вартість транспортування розкривних порід;

2) значні простой великої кількості технологічного устаткування;

3) підвищені втрати обсягів та якості рудної сировини, що видобувається.

Названі чинники відображають технологічну ефективність видобутку і переробки (збагачення) марганцевої руди, а в результаті, зумовлюють конкурентоспроможність металургійної сировини відповідно до ринкового попиту. Розглянемо докладніше ці чинники, що дозволить визначити шляхи забезпечення конкурентних переваг продукції.

Витрати на процеси видобутку і збагачення руди оцінюються собівартістю

виробництва концентрату [10]. Оцінимо технологію видобутку горизонтального пласта марганцевої руди на кар'єрах ПГЗК протягом 10 років. Виходячи з ринкового попиту концентрат – 12500 т на місяць визначено продуктивність кар'єру по руді – 600 тис. т/рік. Витрати на безпосередньо збагачення руди з будь-якого кар'єру для виробництва 1 т концентрату прийнято рівними 5,57, грн., обсяг інвестицій на розвиток технічних засобів – 3300 тис. грн./рік.

На підставі розрахунків з початку періоду, що розглядається, найменші, майже однакові (з різницею 4%), витрати на гірничо-збагачувальне виробництво досягаються при використанні рудної сировини, видобутої на Шевченківському та Північному кар'єрах (табл. 1). Це відбувається завдяки більш працездатним комплексам устаткування та сприятливим гірничо-геологічним умовам відпрацювання рудного пласта цих кар'єрах. Складні умови видобутку, а також експлуатація сильно зношеного технологічного устаткування зумовлюють на кар'єрі Чкаловський-1 найбільші витрати на виробництво концентрату (подорожчання в порівнянні з середнім рівнем витрат 25%). Крім зазначеного вище, це можна пояснити невідповідністю на кар'єрі потужного устаткування, що потребує значних витрат на його обслуговування, фактичного попиту на рудну сировину, що сильно скоротився останнім часом. Таким чином, впроваджені на зазначених вище кар'єрах комплекси устаткування, які краще адаптовані до технологічних схем гірничодобувних робіт, за витратами на виробництво концентрату є більш вигідними, ніж на Чкаловському-1 та Чкаловському-2 кар'єрах.

Таблиця 1. Основні складові витрат на гірничо-збагачувальне виробництво

Кар'єр	На 1 т рудної сировини, грн.			На 1 т концентрату, грн.	
	розробка розкривних порід	видобуток руди	транспортування руди	охорона навколишнього середовища	всього
Шевченківський	3,55	26,46	3,55	14,34	129,17
Північний	6,35	39,31	6,35	18,04	134,47
Чкаловський-2	11,30	34,64	11,3	21,31	142,39
Чкаловський-1	9,60	35,85	9,6	21,03	167,38
Чкаловський-1 (80%)	+	8,39	33,97	8,39	19,69
Шевченківський (20%)					159,84
Чкаловський-1 (60%)		7,18	32,09	7,18	18,35
Шевченківський (40%)					152,1

Для повнішого використання наявних запасів марганцеворудної сировини з кар'єрів на збагачення направляється рудопотік усередненої якості (за змістом Mn), отриманий в результаті змішування багатой і бідної руди з різних кар'єрів. Крім того, це дозволяє контролювати витрати на виробництво концентрату шляхом усереднення собівартості видобутої сировини. Залежно від співвідношення показників якості руди та її собівартості на кар'єрах, об'єднаних одним рудопотоком, витрати на виробництво концентрату або знижуються або підвищуються. Так, домішуючи 20-40% бідної, проте дешевої руди, Шевченківського кар'єру до багатой руди з кар'єру Чкаловський-1, витрати на концентрат можуть бути знижені відповідно на 5-10% (рис. 1).

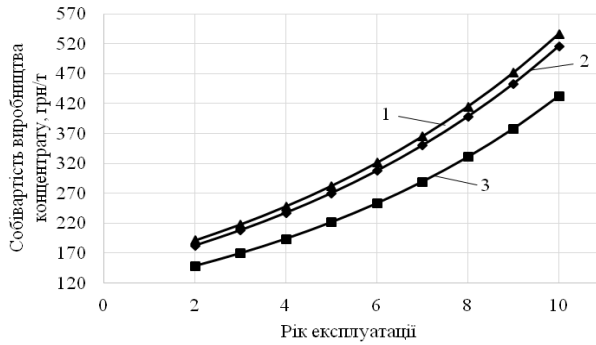


Рисунок 1. Собівартість виробництва концентрату при використанні рудної сировини різних кар'єрів: 1 – Чкаловський-1, 2 – Чкаловський-1 (60%) та Шевченківський (40%), 3 – Шевченківський

При обґрунтуванні доцільного рівня усереднення якості руди за критерієм собівартості виробленого концентрату слід враховувати, що вміст металу Mn_p у руді впливає на коефіцієнт вилучення цього металу в концентрат, а значить, втрати експлуатаційних запасів рудної сировини родовища (рис. 2). За статистичними даними збагачувальних фабрик ПГЗК між коефіцієнтом ε і вмістом металу Mn_p існує статистична залежність:

$$\varepsilon = -0,0168Mn_p^2 + 2,4025Mn_p + 15,583, \%; R^2=0,941 \quad (1)$$

На підставі залежності (1) підвищення вмісту марганцю в руді при його незначному вмісті (21-25%) не призводить до істотного підвищення рівня вилучення металу в концентрат (від 61% до 64%), водночас при високому вмісті (28- 32%) підвищення вмісту марганцю дозволяє значно підвищити рівень цього вилучення (від 68% до 76%), завдяки чому досягаються найменші втрати металу. Значить, найменші втрати металу Mn_p відбуватимуться при розподілі видобутку руди та її збагаченні окремими рудопотоками. Усереднення руди за групами кар'єрів за вказаним критерієм ефективності слід здійснювати таким чином, щоб в одній групі складався концентрат з низьким вмістом марганцю в рудній сировині, а в іншій – з високим.

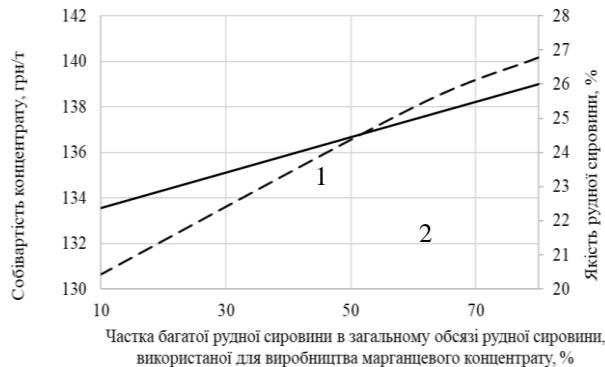


Рисунок 2. Графіки, що демонструють вплив якості рудної сировини (1) на собівартість виробництва концентрату (2).

Сьогодні, збагачувальні фабрики виробляють концентрат із рудної сировини, яку постачає періодично той чи інший кар'єр. Якщо концентрат виробляється з багаті руди, то обсяг її видобутку знижується, отже, знижується обсяг розкривних порід, які б видалити з кар'єрів при видобутку руди середньої якості. У той же час, при виробництві заданого об'єму концентрату з бідної руди потрібно буде видобувати її більший об'єм, що призведе до збільшення об'єму розкривних порід. Встановимо обсяг цих порід, який може бути скорочений, якщо обсяг річного видобутку буде усереднюватися за якістю руди, що збагачується, шляхом змішування декількох кар'єрних потоків.

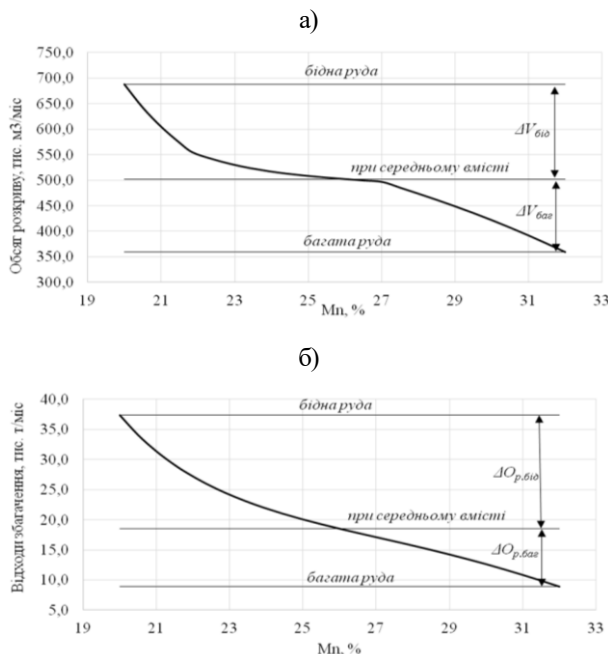


Рисунок 3. Графіки зміни обсягів розкривних порід (а) та відходів збагачення (б) залежно від вмісту марганцю в кар'єрному рудопотоку

За результатами розрахунку авторів, нижча якість марганцевої руди (21,85% Mn) призводить до нижчого коефіцієнта вилучення металу (0,601) та найбільших обсягів збагачення руди (41,36 тис. т/міс.), хвостам збагачення (28,86 тис. т/міс.) та розробці розкривних порід (570,8 тис. м³/міс.). Підвищення якості рудної сировини дозволяє покращити показники виробництва концентрату за рахунок меншого об'єму розкривних порід. Змішування рудної сировини в рівних обсягах для випуску 600 тис. т концентрату показує можливість їхнього скорочення від 4,71% до 10,05%.

Якщо необхідно відповідно до попиту виробити обсяг концентрату $O_{кп}$, то цього слід видобути обсяг руди $O_{рп}$. При поділі всього обсягу руди, що видобувається декількома кар'єрами, кожен із них має забезпечити рудну сировину в обсязі O_{pi} . Виходячи з цього обсягу руди, i -й кар'єр повинен виробити відповідний обсяг розкривних порід V_n . У такому разі буде виконуватись умова:

$$V_{ni} = O_{pi} K_{pi} = O_{кп} \beta_i K_{pi}, \text{ м}^3/\text{міс. (рік)}, \quad (2)$$

де K_{pi} – коефіцієнт розкриву при видобутку руди на i -му кар'єрі, м³/т;
 β_i – витрати руди i -го кар'єру на 1 т концентрату, т.

Вираз (2) дозволяє планувати коефіцієнт розкриття рудного пласта згідно з якістю рудної сировини. Як впливає з виразу, об'єм розкривних порід можна регулювати зміною виходу концентрату β_i із сирової руди i -го кар'єру за рахунок її якості – від бідної руди до багаті відносно усередненої. Зниження або перевищення сумарного обсягу розкриття, який треба видалити з кар'єру для видобутку заданого обсягу руди та виробництва концентрату встановлюється, виходячи із суми обсягів розкривних порід, що забезпечують видобуток обсягів усіх кар'єрних рудопотоків.

Розглянуто ефективність запропонованого рішення щодо збагачення заданого обсягу руди за окремими рудопотоками, виходячи з обсягів розкривних порід та відходів (рис. 3). Досліджено два рудопотоки, які суттєво відрізняються за вмістом марганцю в руді (бідний – 20% та багатий – 32%, у середньому – 26%). Якщо вміст підвищується з 20% до 26%, то необхідний обсяг розкриття зменшується на 185 тис. м³/міс., а при зниженні вмісту з 32% до 26% – збільшується на 140 тис. м³/міс. (рис. 3, а). Аналогічно змінюються місячні обсяги відходів збагачення: 19 та 10 тис. т (рис. 3, б). Ці результати розрахунку свідчать про доцільність роздільного збагачення багатого та бідного рудопотоків. Тобто акумулювання необхідного обсягу руди заданої якості на збагачувальній фабриці для виробництва концентрату з подальшим переналаштуванням процесів збагачення на руду з іншим вмістом металу (інший рудопотік / кар'єр) для отримання концентрату вищого/нижчого сорту з мінімальними витратами.

4. Висновки

Обґрунтовано, що технологічні та економічні умови видобутку й переробки рудної сировини в цілому характеризуються якістю рудопотоку (за вмістом металу), що формується відповідно до цих умов. Узагальнено методичний підхід до оцінки ефективності діяльності гірничо-збагачувального підприємства, що враховує собівартість концентрату, втрати запасів рудної сировини та металу у відходах збагачення, а також обсяг розкривних порід, які потрібно видалити з кар'єру для задоволення ринкового попиту на концентрат.

За даними ПГЗК, між ступенем вилучення металу з рудної сировини в концентрат та якістю марганцевої руди існує певна непрямоїнійна залежність, згідно з якою підвищення вмісту марганцю в руді при незначному вмісті не призводить до суттєвого підвищення ступеня вилучення металу, а при високому вмісті його підвищення дозволяє значно підвищити ступінь вилучення. Звідси випливає, що якість марганцевої руди слід розподіляти і усереднювати за двома групами кар'єрів в такий спосіб, щоб у одній групі отримано низький, тоді як у другій – високий вміст марганцю в рудній сировині. Це забезпечує найбільший сумарний обсяг вилученого металу для двох рудопотоків.

Розроблено науково-прикладний підхід до визначення раціонального обсягу розкривних порід, що забезпечує розкриття рудного пласта в обсязі, що визначається раціональним ступенем вилучення металу з рудної сировини при її збагаченні декількома рудопотоками. Такий підхід дозволяє мінімізувати витрати кар'єру на роботи. Якщо марганцеву руду збагачувати роздільними (бідною та багатією) потоками, то необхідний обсяг розкриття в умовах ПГЗК зменшується на 45 тис. м³/міс. (10%).

Література

1. Shapar, A.G., & Yakubenko, L.V. (2012) Razrabotka ekologo-resursosberegayushey tehnologii osvoeniya krutopadayuschih mestorozhdeniy. *Ekolohiia i pryrodokorystuvannia*, (15), 96-106.
2. Chetverik, M.S., Babi, E.V., Bubnova, E.A., & Tereschenko, V.V. (2013). Osnovnye napravleniya ratsionalnogo prirodopolzovaniya pri otkrytoy dobyche poleznykh iskopaemykh. *Hirnychiy visnyk*, 1(96), 58-62.
3. Prokopenko, V., Pilov, P., Cherep, A., & Pilova, D. (2020) Managing Mining Enterprise

- Productivity by Open Pit Reconstruction. *Eurasian mining*, 1, 42-46.
<https://doi.org/10.17580/em.2020.01.08>
4. 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.
 5. Evren Deniz Yaylac, & 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.
 6. Matías Siña, Juan Ignacio Guzmán. (2018). Real option valuation of open pit mines with two processing methods. *Journal of Commodity Markets*, *Режим доступа:* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405851317302167>
 7. Ryan C. Goodfellow, Roussos Dimitrakopoulos. (2016). Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty. *Applied Soft Computing*, 40, 292-304.
 8. 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.
 9. 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.
 10. Prokopenko, V.I., Cherep, A.Yu., & Pilova, D.P. (2021). Justification of methodical approach to mining and processing efficiency evaluation. *Gornyi Zhurnal*, (8), 39-44.
<https://doi.org/10.17580/gzh.2021.08.07>