

ГІРНИЦТВО

УДК 622.271

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-24>

АДАПТИВНА МОДЕЛЬ КЛАСИФІКАЦІЇ ГІРНИЧОЇ МАСИ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ СИСТЕМИ «КАР'ЄР-ТЕХНОГЕННЕ РОДОВИЩЕ»

Григор'єв Юліан Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри відкритих гірничих робіт
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-1780-5759

Григор'єв Ігор Євгенійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0006-2787-106X

Лебеденко Володимир Володимирович,

аспірант
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0006-4185-4098

Робота присвячена дослідженню впливу ціни на режим гірничих робіт у системі «кар'єр – техногенне родовище». Актуальність роботи зумовлена тим, що традиційний бінарний поділ гірничої маси на руду та розкрив не забезпечує об'єктивного врахування проміжних категорій сировини в умовах мінливої техніко-економічної кон'юнктури. У роботі техногенну сировину розглянуто як окремий функціональний клас між рудою та розкривом, а бортовий вміст – як динамічний економічний параметр, чутливий до зміни ціни. Методично дослідження ґрунтується на побудові блочної економічної моделі, інтерпретації межі економічної беззбитковості блока як економічного аналога бортового вмісту, визначенні кінцевого контуру кар'єру за допомогою методів графової оптимізації та подальшій трикомпонентній класифікації блоків за критеріями мінімального промислового вмісту й поточної цінності блоку. Для оцінки впливу цінових сценаріїв на режим гірничих робіт використано кумулятивні графіки, побудовані для базового сценарію та сценаріїв покращення цінової кон'юнктури. Встановлено, що зміна ціни призводить до перегрупування блоків між класами «руда – техногенна сировина – розкрив», змінює структуру рудопотоку, знижує випереджальне розкривне навантаження та впливає на режим відпрацювання. Обґрунтовано, що техногенна сировина може розглядатися як керований резерв адаптації виробничої системи до ринкових коливань, а інтеграція її в модель відкритої розробки створює передумови для підвищення ефективності використання мінерально-сировинної бази та вдосконалення довгострокового проектування.

Ключові слова: бортовий вміст, блочна модель, техногенне родовище, техногенна сировина, кінцевий контур кар'єру, режим гірничих робіт, відкриті гірничі роботи.

Hryhoriev Yulian, Hryhoriev Ihor, Lebedenko Volodymyr. An Adaptive Model of Geomaterial Classification for Strategic Mine Design within the "Open-Pit – Technogenic Deposit" Framework

This research investigates the impact of pricing dynamics on the mining sequence within an integrated "open-pit – technogenic deposit" system. The relevance of the study stems from the limitations of the traditional binary classification of geomaterials into ore and waste, which fails to provide an objective assessment of intermediate raw material categories under volatile technical and economic conditions. In this study, technogenic materia is treated as a distinct functional class situated between ore and waste, while the cut-off grade is defined as a dynamic economic parameter sensitive to price fluctuations.

Methodologically, the research is based on the construction of an economic block model, interpreting the economic break-even point of a block as an analogue for the cut-off grade. The ultimate pit limit is determined through graph optimization methods, followed by a three-component block classification based on the criteria of minimum industrial grade and current block value. To assess the impact of pricing scenarios on the mining sequence, cumulative curves were constructed for both the base case and improved market condition scenarios.

The findings indicate that price fluctuations trigger a reclassification of blocks among the "ore – technogenic material – waste" categories, alter the structure of the raw material flow, reduce the pre-stripping load, and modify the overall mining regime. The study substantiates that technogenic material serves as a manageable reserve for adapting production systems to market fluctuations. Integrating this approach into open-pit mining models provides a robust framework for enhancing the efficiency of the mineral resource base and refining the engineering design of open-pit mining operations.

Key words: cut-off grade, block value, technogenic deposit, technogenic raw material, ultimate pit limit, mining regime, open-pit mining.

Вступ. Ефективне управління мінерально-сировинною базою глибоких залізорудних кар'єрів дедалі більше визначається поєднаним впливом гірничо-геологічних, технологічних та економічних чинників. Із поглибленням гірничих робіт зростають коефіцієнт розкриття, енергоємність транспортування гірничої маси та складність геометрії робочої зони, тоді як середній вміст корисного компоненту в руді знижується. За таких умов економічна межа доцільності вилучення окремих блоків перестає бути статичною характеристикою та залежить від динаміки цін, рівня технологічного вилучення, структури витрат і режиму гірничих робіт. Отже, бортовий вміст доцільно розглядати, як динамічний інструмент адаптивного управління ресурсною базою кар'єру [1; 2; 3].

Традиційні підходи до проектування відкритих гірничих робіт ґрунтуються на жорсткому бінарному поділі гірничої маси на руду та розкрив. Однак для родовищ складної геологічної будови в умовах цінової мінливості такий підхід є недостатнім, оскільки він не враховує проміжних категорій сировини [4; 5], яка на момент відпрацювання не відповідає критеріям економічної доцільності, але за сприятливих умов здатна набувати виробничої цінності. За такої постановки техногенне родовище має розглядатися як інтегрований елемент єдиної системи «кар'єр – техногенне родовище», структура якої формується безпосередньо на етапі довгострокового проектування гірничих робіт.

Ключовим теоретичним аспектом цієї постановки є взаємозв'язок між бортовим вмістом, економічною цінністю блока та співвідношенням класів гірничої маси в межах кінцевого контуру кар'єру. У межах блочної моделі межа доцільності відпрацювання може бути виражена через показник цінності блока BV , що характеризує різницю між очікуваним доходом від вилучення корисного компоненту та сукупними витратами на видобуток, транспортування та переробку. За такого підходу умова $BV = 0$ визначає межу економічної рівноваги і може розглядатися як економічний аналог бортового вмісту [1; 2]. Поєднання критеріїв економічної цінності блоку та мінімально промислового вмісту дає змогу виокремити техногенну сировину як окремий

функціональний клас [3; 4] між рудою та розкриттям, а отже, дослідити внутрішню економічну структуру кар'єрного простору.

У межах даного дослідження кінцеві контури кар'єру приймаються умовно сталими. Виходячи з цього, метою роботи є виявлення впливу ціни на режим гірничих робіт у системі «кар'єр – техногенне родовище». Для досягнення поставленої мети визначено кінцевий контур кар'єру в межах блочної моделі [6; 7], обґрунтовано використання умови $BV=0$ як економічного аналога бортового вмісту, виконано класифікацію блоків за критеріями мінімального промислового вмісту та цінності блоку з виділенням класу техногенної сировинної, а також досліджено зміну режимів гірничих робіт для різних цінових сценаріїв.

Методи та методики дослідження. Методологія дослідження ґрунтується на послідовному переході від просторово-економічної формалізації блочної моделі до сценарного аналізу режимів гірничих робіт у межах умовно сталого контуру кар'єру. Така логіка зумовлена тим, що в запропонованій концепції техногенне родовище не є заданим самостійним об'єктом. Воно виступає похідним результатом комплексу рішень щодо економічної оцінки блоків, оконтурення, класифікації гірничої маси та порядку її залучення до виробничого циклу. З огляду на це, методичний апарат спрямовано на розкриття внутрішніх механізмів перерозподілу матеріалу між функціональними класами «руда – техногенна сировина – розкрив» та аналіз адаптації режиму гірничих робіт до мінливого техніко-економічного середовища.

На першому етапі дослідження було сформовано блочну модель родовища, у межах якої кожна виймальна одиниця розглядалася як елементарний носій просторової, якісної та вартісної інформації. Для кожного блока визначено вміст корисного компоненту, його належність до потенційно мінералізованої або немінералізованої частини масиву, а також показник цінності блоку, що відображає очікуваний результат відпрацювання цього блока за поточних техніко-економічних умов. У такій постановці економічна цінність блока задається як різниця між очікуваним доходом від реалізації вилученого

корисного компоненту та сукупними витратами на видобуток, транспортування та переробку.

На другому етапі визначено кінцевий контур кар'єру як економічно оптимальну множину блоків з урахуванням просторово-геометричних обмежень відкритої розробки. Для цього застосовано графову постановку задачі топологічної оптимізації, пов'язану з класичним підходом Лерча – Гросмана [7; 8]. У межах цієї постановки блоки подано вершинами орієнтованого графа з вагами, що відповідають їхній економічній цінності, тоді як просторові залежності задаються дугами передування. Унаслідок цього задача зводиться до пошуку замкненої множини блоків, яка одночасно максимізує сумарну економічну цінність і не порушує обмежень щодо просторової допустимості гірничих робіт.

Після визначення кінцевого контуру здійснено класифікацію блоків за двома критеріями: мінімально промисловим вмістом та цінністю блоку [1; 2]. За цією схемою руда ідентифікується умовою $BV > 0$, техногенна сировина – умовами $g \geq g_{main}$ та $BV \leq 0$, а розкрив – умовою $g < g_{main}$. Такий підхід дозволив виділити техногенну сировину як окремий функціональний клас [3; 5] між рудою та розкривом і розглядати її як ресурсну основу техногенного родовища. Як представлено на рис. 1, блочна модель досліджуваного техногенного родовища для сценарію «Базовий» дозволяє візуалізувати структуру блоків за класами «руда», «техногенна сировина» та «розкрив» відповідно до встановлених критеріїв беззбитковості.

На завершальному етапі виконано сценарне моделювання для базового цінового сценарію та сценаріїв покращення кон'юнктури цін

(+10%, +20%, +30% [10; 11]. Для аналізу режиму гірничих робіт розглянуто два крайні сценарії відпрацювання – режим пошарового виймання (γ_0) та режим виймання крутопохилими шарами (γ_{max}). У цій роботі параметр γ використовується як сценарний параметр операційної геометрії фронту відпрацювання і не інтерпретується як нормативний кут стійкого укоси борту. Основним інструментом порівняння сценаріїв слугував аналіз кумулятивних графіків [9; 10], що відображають динаміку співвідношення між рудою, техногенною сировиною, розкривом і сумарною гірничою масою в межах кінцевого контуру.

Результати та дискусії. Отримані результати показали, що за фіксованого кінцевого контуру зміна техніко-економічних умов спричиняє системну зміну внутрішньої економічної структури кар'єрного простору. Передусім підтверджено доцільність використання умови $BV=0$ як вартісного аналога бортового вмісту [1; 2], оскільки саме вона відокремлює рентабельні блоки від тих, відпрацювання яких за поточних умов не забезпечує компенсації витрат. Це означає, що межа кондиційності в рамках запропонованої моделі визначається поточним економічним станом системи.

Застосування критеріїв мінімального промислового вмісту g_{min} та економічної цінності блоку BV дозволило виокремити проміжний клас техногенної сировини, який у традиційній бінарній схемі «руда – розкрив» фактично залишається неідентифікованим. Показано, що цей клас формує ресурсну основу техногенного родовища в межах системи «кар'єр – техногенне родовище». Саме завдяки цьому техногенна сировина набуває статусу окремого

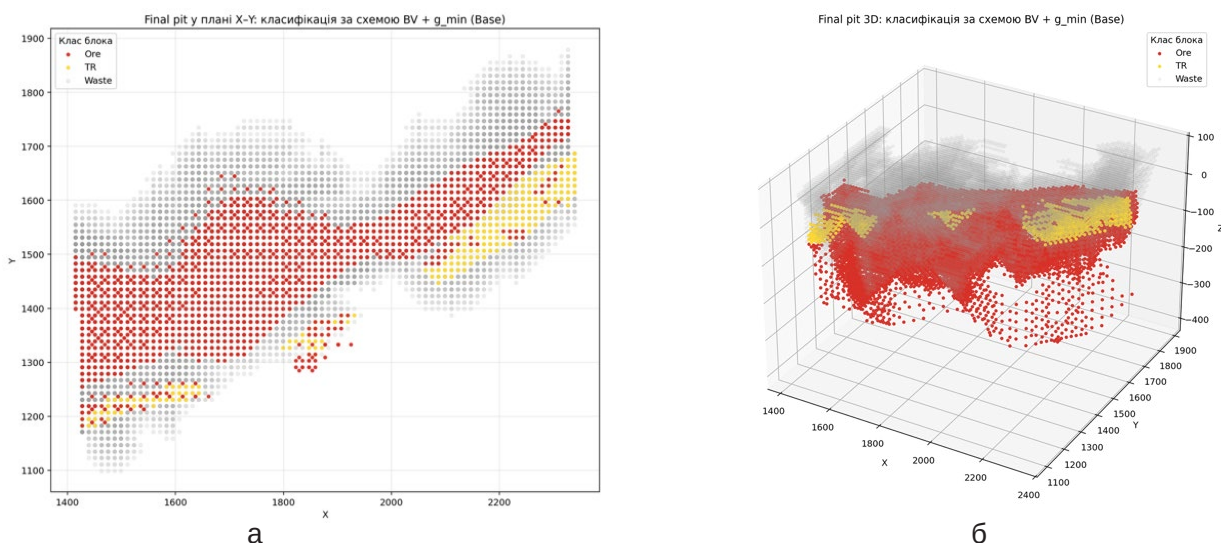


Рис. 1. Блочна модель досліджуваного геогенного родовища із класифікацією блоків за сценарієм «Базовий» (середовище Spyder 6, Python): а) вид зверху; б) ізометрія

функціонального об'єкта управління [4; 5], здатного змінювати своє цільове призначення залежно від рівня цін. На рис. 2 проілюстровано блочну модель за умови зростання ціни на 20 %, де чітко простежується розширення зони економічно цінних блоків за рахунок перекласифікації частини класу «розкрит» у клас «техногенна сировина» та частини класу «техногенна сировина» у клас «руда».

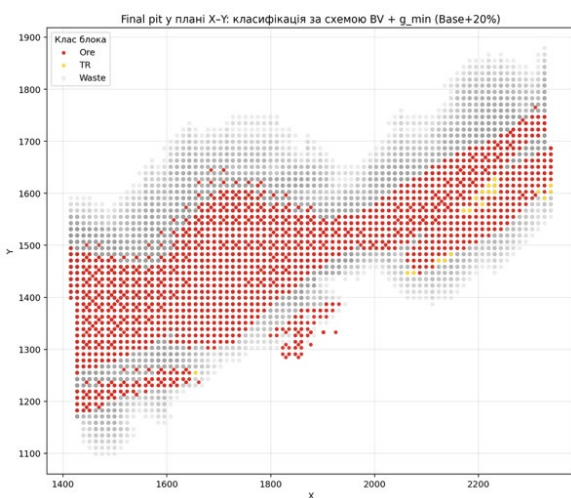
Подальший аналіз спрямований на встановлення того, яким чином ціна впливає на режим гірничих робіт та визначає динаміку залучення ресурсної бази до відпрацювання. Для цього в межах кінцевого контуру зіставлено два граничні режими доступу до блоків, описані параметром γ – кут укосу робочого борту кар'єра: режим пошарового виймання (γ_0) та режим виймання крутопохилими шарами (γ_{max}). Уже на рівні загальної форми кумулятивних кривих встановлено, що між сценаріями існують не лише кількісні, а й структурні відмінності.

Порівняння кумулятивних графіків для базового сценарію засвідчило, що навіть без зміни ринкових умов перехід до трикомпонентної класифікації впливає на режим гірничих робіт. Завдяки врахуванню техногенної сировини система забезпечує формування більшого обсягу корисної маси без пропорційного зростання розкривного навантаження. При відповідних економічних умовах господарювання цей ефект масштабується: техногенна сировина активніше залучається до рудопотоку, функціонально придатна частина ресурсної бази розширюється, а блоки з вищою економічною цінністю залучаються до відпрацювання раніше. У технологічному плані виокремлена сировина

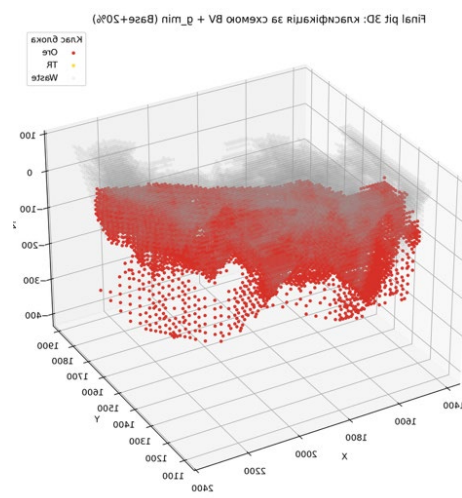
являє собою низькокондиційно мінералізовану масу, яка за традиційного підходу класифікується як розкрит та спрямовується у відвали. Проте за сприятливих економічних умов, коли її поточна цінність долає межу беззбитковості, вона змінює своє функціональне призначення і перенаправляється до складу шихтування або безпосередньо в переробний цикл.

Для візуалізації змін ресурсної бази під впливом ціни було проведено порівняльний аналіз кумулятивних залежностей. На рис. 3 наведено результати моделювання для «Базового» сценарію та прогнозованого сценарію зі зростанням ціни на 20%, що дозволяє оцінити динаміку залучення техногенної сировини при зміні кутів робочого борту кар'єру.

Особливо показовим виявився аналіз сімейства кумулятивних графіків для сценарних кроків +10%, +20% і +30% ціни [10; 11]. Він продемонстрував, що кожен етап зростання ціни системно зміщує кумулятивну динаміку відпрацювання, формуючи інтенсивніший і збалансованіший рудопотік у межах незмінного кінцевого контуру. Це підтверджує, що вплив ціни реалізується через внутрішню перекласифікацію блоків і адаптацію режиму освоєння ресурсної бази. Водночас характерна «східчастість» кумулятивних кривих, особливо для режиму пошарового виймання (γ_0), підтверджує, що цей ефект є не алгоритмічною похибкою, а об'єктивним відображенням дискретної структури 3D-моделі та просторової логіки графа передуваль. Як ілюструє рис. 4, сімейство кумулятивних графіків для кроків ціни +10%, +20% та +30% демонструє тенденцію до зміщення траєкторії відпрацювання та збільшення потужності рудопотоку.



а



б

Рис. 2. Блочна модель досліджуваного геогенного родовища із класифікацією блоків за сценарієм «Базовий +20%» (середовище Spyder 6, Python): а) вид зверху; б) ізометрія

Узагальнюючи сказане, отримані результати підтверджують, що істотна зміна внутрішньої економічної структури відпрацювання може відбуватися з умовно сталими межами кінцевого контуру. Це має важливе теоретичне і практичне значення. У теоретичному плані запропонований підхід розширює уявлення про бортовий вміст як про динамічний економічний критерій, а також виокремлює техногенну сировину як окремий функціональний клас. У практичному аспекті він відкриває можливість адаптивного планування гірничих робіт через внутрішню економічну переоцінку блоків, а не лише через

повторне оконтурення кар'єру. Разом із тим подальший розвиток моделі потребує розширеної кількісної оцінки результатів, зокрема через інтеграцію індикаторів перекласифікації блоків, коефіцієнтів розкриття, середнього вмісту у рудопотоці та прямого зв'язку з інтегральним показником чистого дисконтованого доходу [9; 10].

Висновки. У статті обґрунтовано доцільність переходу від традиційної статичної моделі відкритої розробки до системного адаптивного підходу, у межах якого кар'єр і техногенне родовище розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної виробничо-економічної системи.

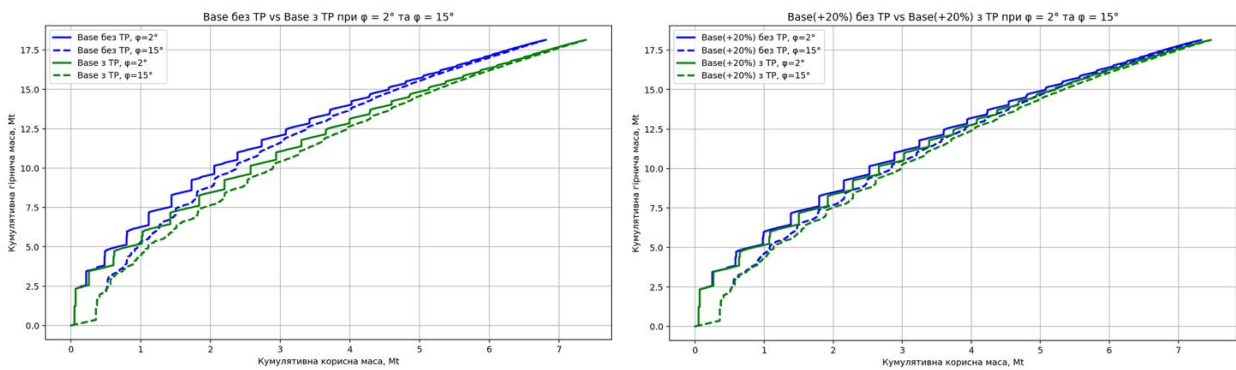


Рис. 3. Порівняльний аналіз кумулятивних залежностей видобутку гірничої маси для цінкових сценаріїв «Базовий» та «Базовий+20%» для двох крайніх випадків режимів гірничих робіт ($\gamma=2^\circ$ та $\gamma=15^\circ$)

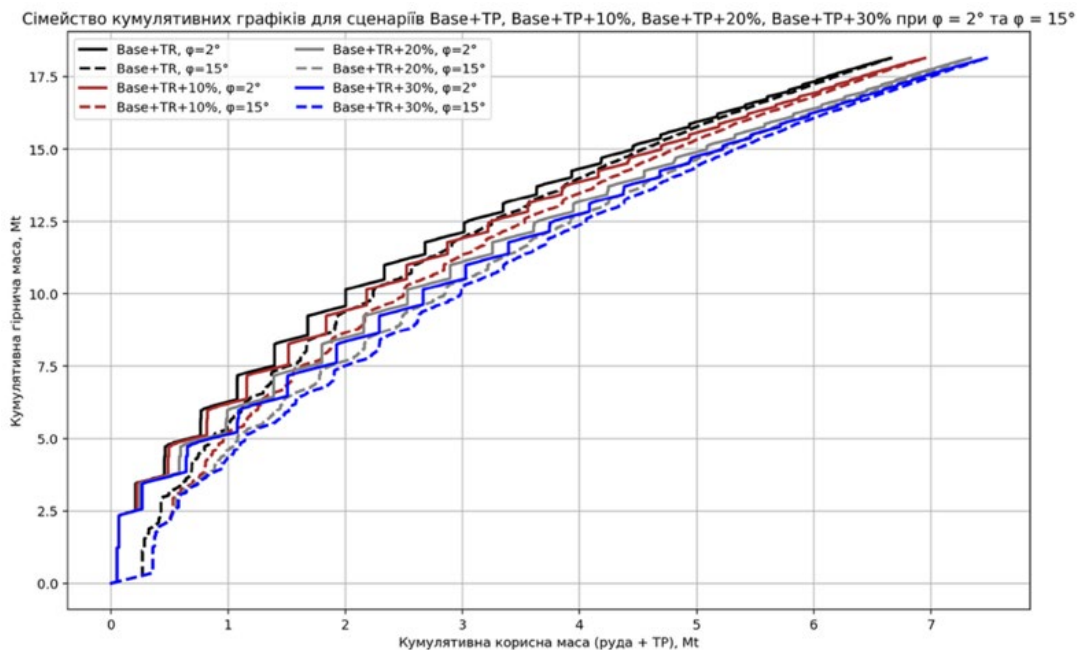


Рис. 4. Сімейство кумулятивних залежностей видобутку руди для різних сценаріїв ціни від «Базовий» до «Базовий+30%» та режимів гірничих робіт ($\gamma=2^\circ$ та $\gamma=15^\circ$)

Доведено, що техногенна сировина не є пасивним наслідком видобутку, а формується як похідний результат рішень щодо оконтурення, економічної оцінки блоків та режиму гірничих робіт. Такий підхід дозволяє перейти від ретроспективного аналізу накопичених техногенних масивів до їх інтерпретації як керованого резерву на етапі довгострокового проєктування.

Встановлено, що в умовах блочно-вартісної моделі умова $BV=0$ є дієвим економічним аналогом бортового вмісту, оскільки визначає межу беззбитковості блока за поточних техніко-економічних параметрів. Це дає змогу трактувати бортовий вміст як динамічний економічний параметр, чутливий до зміни цінових умов, а поєднання критеріїв мінімально промислового вмісту та цінності блоку – як основу для точнішого відображення внутрішньої структури кар'єрного простору. На цій основі виокремлено проміжний функціональний клас – техногенну сировину, що займає положення між рудою та розкритом і формує ресурсну основу техногенного родовища.

Результати сценарного моделювання підтвердили, що за умовно сталого кінцевого контуру покращення техніко-економічних умов змінює внутрішню економічну структуру кар'єрного простору, спричиняє перегрупування блоків між

класами «руда – техногенна сировина – розкрит» та впливає на режим гірничих робіт. Аналіз кумулятивних залежностей засвідчив, що сприятливіші цінові умови забезпечують ефективніше формування рудопотоку, зменшення випереджального розкриття та скороченню термінів розкриття промислово кондиційних горизонтів. Це підтверджує, що техногенна сировина за відповідних умов виступає елементом адаптації та збільшення потужності рудопотоку в системі «кар'єр – техногенне родовище».

Практичне значення запропонованого підходу полягає у створенні методичної основи для довгострокового проєктування відкритих гірничих робіт яке дозволяє підтримувати економічну життєздатність проєктного контуру шляхом зміни режиму гірничих робіт та перекласифікацію класів сировини в умовах мінливої ринкової кон'юнктури. Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розширенням кількісної оцінки отриманих результатів, інтеграцією алгоритмів календарного планування, динамічної моделі шихтування, урахуванням обмежень переробної ланки та прямого розрахунку додаткового економічного ефекту за критерієм чистого дисконтованого доходу для альтернативних сценаріїв залучення техногенної сировини.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Lane K. F. The Economic Definition of Ore: Cut-off Grades in Theory and Practice. *London : Mining Journal Books*, 1988. 149 p.
2. Ahmadi M. R. Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model. *Journal of Sustainable Mining*. 2018. Vol. 17, No. 2. P. 68–75. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.04.002.
3. Григор'єв Ю. І., Пилипчук Д. І., Лебеденко В. В., Луценко С. О., Перегудов Ю. В. Адаптивне управління параметрами комплексної механізації відкритих гірничих робіт за зміни бортового вмісту корисного компонента. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 4. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-4-40.
4. Григор'єв Ю. І. Підвищення ефективності проєктних рішень щодо пошуку оптимального режиму гірничих робіт при сумісному комплексному відпрацюванні техногенних і геогенних родовищ. *Якість мінерального сировини : збірник наукових праць / матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг*, 2014.
5. Григор'єв Ю. І., Григор'єв І. Є. Дослідження режиму гірничих робіт з урахуванням сумісного відпрацювання геогенного й техногенних родовищ // *Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів : матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*. Житомир : ЖДТУ, 2016.
6. Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum design of open-pit mines. *Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*. 1965. Vol. 58. P. 47–54.
7. Picard J.-C. Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems. *Management Science*. 1976. Vol. 22, No. 11. P. 1268–1272. DOI: 10.1287/mnsc.22.11.1268.
8. Hochbaum D. S. The pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum-flow problem. *Operations Research*. 2008. Vol. 56, No. 4. P. 992–1009. DOI: 10.1287/opre.1080.0524.
9. Meagher C., Dimitrakopoulos R., Avis D. Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem – a review. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. P. 508–526. DOI: 10.1134/S1062739114030132.

10. Breed M. F., van Heerden D. Post-pit optimization strategic alignment. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016. Vol. 116, No. 2. P. 109–114. DOI: 10.17159/2411-9717/2016/v116n2a1.
11. Birch C. Optimization of cut-off grades considering grade uncertainty in narrow, tabular gold deposits. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017. Vol. 117, No. 2. P. 149–156. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n2a6.

REFERENCES:

1. Lane, K. F. (1988). *The economic definition of ore: Cut-off grades in theory and practice*. London: Mining Journal Books.
2. Ahmadi, M. R. (2018). Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model. *Journal of Sustainable Mining*, 17(2), 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.04.002>.
3. Hryhoriev, Yu. I., Pylypchuk, D. I., Lebedenko, V. V., Lutsenko, S. O., & Perehudov, Yu. V. (2025). Adaptivne upravlinnia parametramy kompleksnoi mekhanizatsii vidkrytykh hirnychykh robit za zminy bortovoho vmistu korysnoho komponenta [Adaptive management of parameters of complex mechanization of open-pit mining under changes in the cut-off grade of the useful component]. *Naukovyi zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky – Metinvest Polytechnic Scientific Journal. Series: Technical Sciences*, (4). <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-40>.
4. Hryhoriev, Yu. I. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti proektnykh rishen shchodo poshuku optymalnogo rezhymu hirnychykh robit pry sumisnomu kompleksnomu vidpratsiuvanni tekhnohennykh i heohennykh rodovyshch [Improving the efficiency of design decisions for finding the optimal mining regime under combined integrated extraction of technogenic and geogenic deposits]. *Kachestvo mineralnogo syrya – Quality of mineral raw materials*. Kryvyi Rih.
5. Hryhoriev, Yu. I., & Hryhoriev, I. Ye. (2016). Doslidzhennia rezhymu hirnychykh robit z urakhuvanniam sumisnoho vidpratsiuvannia heohennoho y tekhnohennykh rodovyshch [Study of the mining regime taking into account the combined extraction of geogenic and technogenic deposits]. In *Materialy III Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Perspektyvy rozvytku hirnychoi spravy ta ratsionalnogo vykorystannia pryrodnykh resursiv»* [Proceedings of the 3rd All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists “Prospects for the development of mining and rational use of natural resources”]. Zhytomyr: ZhDTU.
6. Lerchs, H., & Grossmann, I. F. (1965). Optimum design of open-pit mines. *Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 58, 47–54.
7. Picard, J.-C. (1976). Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems. *Management Science*, 22(11), 1268–1272. <https://doi.org/10.1287/mnsc.22.11.1268>.
8. Hochbaum, D. S. (2008). The pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum-flow problem. *Operations Research*, 56(4), 992–1009. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0524>.
9. Meagher, C., Dimitrakopoulos, R., & Avis, D. (2014). Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem – a review. *Journal of Mining Science*, 50, 508–526. <https://doi.org/10.1134/S1062739114030132>.
10. Breed, M. F., & van Heerden, D. (2016). Post-pit optimization strategic alignment. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(2), 109–114. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n2a1>.
11. Birch, C. (2017). Optimization of cut-off grades considering grade uncertainty in narrow, tabular gold deposits. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(2), 149–156. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n2a6>



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026