



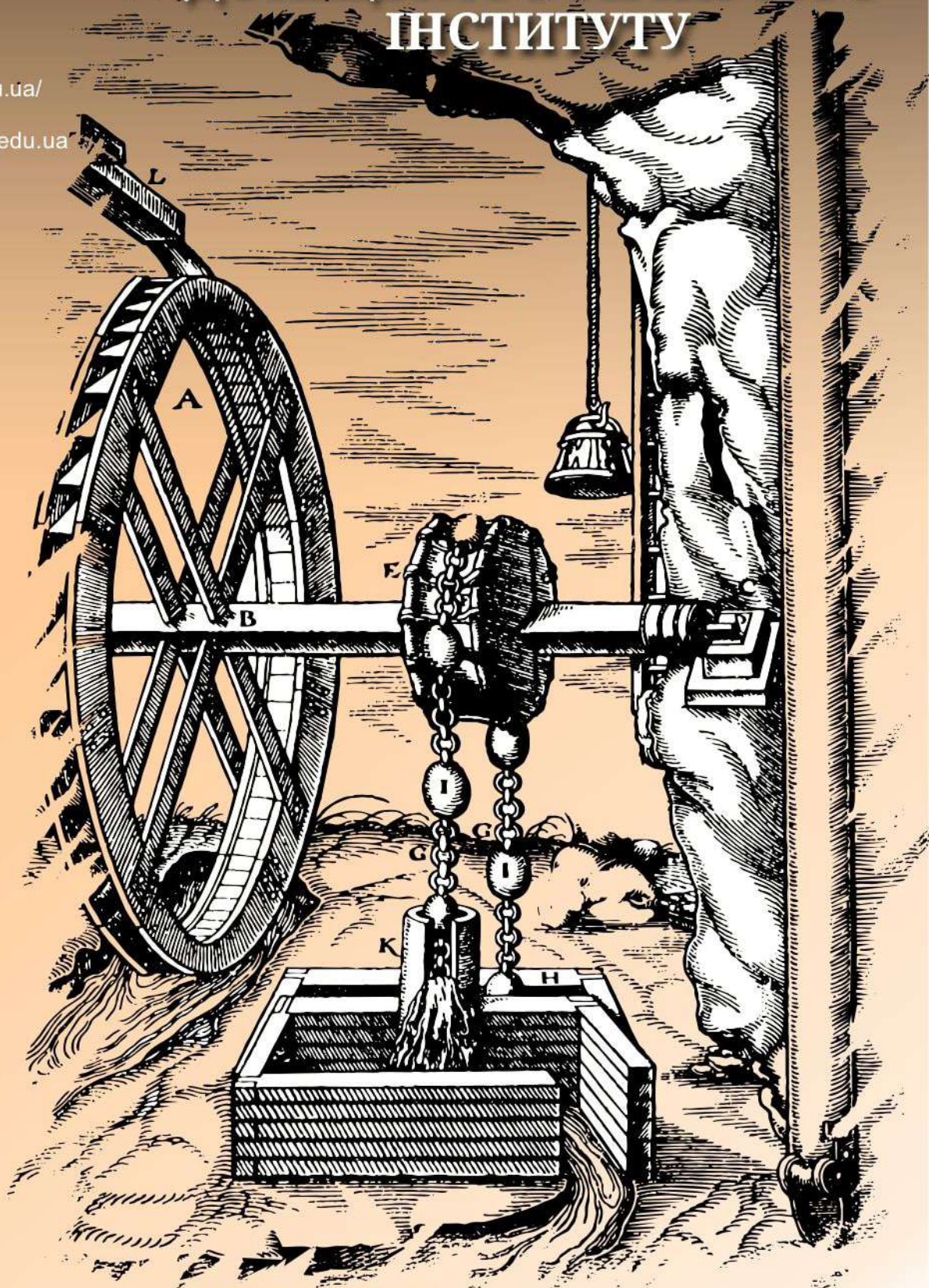
# ВІСТІ

82111, Україна  
Львівська область  
м. Дрогобич  
вул. Самбірська, 76

<http://jdmf.donntu.edu.ua/>

e-mail: [visti@donntu.edu.ua](mailto:visti@donntu.edu.ua)

## ДОНЕЦЬКОГО ГІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

---

# **ВІСТІ**

## **ДОНЕЦЬКОГО ГІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ**

**Всеукраїнський науково-технічний журнал**

**Виходить 2 рази на рік**

**Заснований у липні 1995 року**

# **1 (56)' 2025**

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
STATE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION  
“DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY”**

---

**JOURNAL  
OF DONETSK MINING INSTITUTE**

**Ukrainian scientific and technical journal**

**Published 2 issues per year**

**Founded in July, 1995**

**1 (56)' 2025**

**Drohobych-2025**

The journal publishes research papers on the results of research and development in the field of engineering sciences. The journal is intended for scientists, engineers and technicians of enterprises, design organizations, educational and research institutions, doctorates and postgraduates.

**Founder and publisher** - Donetsk National Technical University

**Editor-in-chief:** S. Podkopaiev, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine).

**Deputy Editor-in-chief:** D. Chepiga, PhD. Tech. Sci., Associate Professor (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine).

**Executive Editor:** O. Isayenkov, PhD. Tech. Sci. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine).

**English language editor:** M. Kabanets, Dr. Ped. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine).

**International Editorial Board:** R. M. Bhattacharjee, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India); Nestor Oszczytko, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Jagellonian University, Krakow, Poland); Józef Parchański, Prof. Dr.-Ing., Dr.h.c. (Politechnika Śląska, Gliwice, Poland); Andrzej Solecki, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Wrocław University, Wrocław, Poland); Upendra Kumar Singh, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India).

**National Editorial Board:** V. Alokhin, Dr. Geolog. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); B. Bolibrukh, Dr. Tech. Sci., Prof. (Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine); I. Bubniak, Dr. Geolog. Sci., Prof. (Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine); S. Hapiciev, PhD. Tech. Sci. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine); V. Glyva, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Aviation University, Kiev, Ukraine); V. Hoho, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); I. Yefremov, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); O. Kipko, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); V. Kostenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); I. Liashok, Dr. Econ. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); A. Merzlikin, PhD. Tech. Sci. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); S. Minieiev, Dr. Tech. Sci., Prof. (Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine); S. Nehrii, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); T. Nehrii, PhD. Tech. Sci., Associate Prof. (Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine); M. Petlovanyi, PhD. Tech. Sci., Associate Prof. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine); I. Sadovenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine); I. Sakhno, Dr. Tech. Sci., Prof. (Technical University Metinvest Polytechnic LLC, Zaporizhzhia, Ukraine); A. Skyrda, PhD in Pedagogy, Associate Prof. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); S. Sukach, Dr. Tech. Sci., Prof. (Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine); O. Shashenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine); O. Tretyakov, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Aviation University, Kyiv, Ukraine); N. Liashok, PhD Econ. Sci. (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine); S. Cheberyachko, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine).

**Technical editors:** A. Petrenko (Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine).

*Journal of Donetsk mining institute is included in the "List of scientific professional publications of Ukraine in which results of doctoral and PhD dissertations in engineering can be published" approved by the Certifying Board of MES of Ukraine on academic boards, order number 374 of March 13, 2017.*

---

*Journal of Donetsk mining institute is indexed in international scientometric database «Google Scholar», presented in the top research libraries of Ukraine, electronic version of the journal is included in the Vernadsky National Library of Ukraine.*

---

The journal is registered in the State Committee on Information Policy, Television and Broadcasting of Ukraine. Certificate: KB 7378 from 03.06.2003.



**CONTENTS**

<b>Serhienko A., Serhienko L.</b> Method of testing mountain rocks for cracking resistance in longitudinal shear	9
<b>Sakhno S., Zavorodnia L., Bulych O., Kyrsanov O.</b> Assessment of asymmetry and heterogeneity of conveyor roadway's instability at all stages of the life cycle: case study PRJSC Pokrovske colliery	15
<b>Holinko V., Zgersky R.</b> Analysis of the influence of psychophysiological factors on individual occupational risk of mining enterprises workers	25
<b>Kovbasa V., Kyrychenko O., Kutsenko M., Vaschenko V., Berezovskyi A., Shkoliar Ie., Motrichuk R.</b> Research of the mechanism and development of models for the development of the combustion process of two-component pyrotechnic mixtures of metal fuels with fluoroplasts under conditions of external thermal influences	31
<b>Vlasov S., Moldavanov Ye., Vlasov V.</b> Impact of proposed measures regarding monitoring, warning, and elimination of emergency states of mechanized fastening on the economic sustainability of coal mining enterprises	47
<b>Sydorenko A., Mykytenko S.</b> Analysis of specific electricity consumption in disc cutting of granites of various hardness	57
<b>Minieiev S., Yanzhula O., Prusova A., Chorniy A., Hryhorenko V.</b> Opening of explosion-resistant seals during degassing after mine fire suppression	66
<b>Rudniev Ye.</b> Micropores of fossil coals and hazardous properties of coal seams during mining operations	75
<b>Hryhoriev Yu., Joukov S., Lutsenko S., Hryhoriev I.</b> Retrospective-causal analysis of open-pit operation as a basis for developing an adaptive management model for a regional mining cluster	81
<b>Merzlikin A., Nazimko V., Yefremov I.</b> Regularities of rock pressure changes during pillarless mining in the zone of regional pressure relief	94
<b>Uriadnikova I.</b> Integrative approach to the safety assessment of water treatment systems	103
<b>Bochkovskyi A., Sapozhnikova N., Purich V.</b> The concept of a model for managing the risk of fatigue in the workplace and controlling this condition of employees during the implementation of state regulation and examination of enterprise activities	112

<b>Bachurin L., Bachurina Ya., Podkopaiev S.</b> On the use of underground booster fans in coal mines (for discussion)	127
<b>Podkopaiev S., Bachurin L., Chepiga D., Bachurina Ya., Pidhurna O., Polii D., Visyn O.</b> Impact of filling wall deformation on the stability of the gob-side entry roadway	134
<b>Khorolskyi A.</b> Results of modeling production indicators and clustering of low-capacity coal mines under residual reserve extraction conditions	144

УДК 622.271:658.5

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-1-81-93>

Ю.І. Григор'єв  
С.О. Луценко  
С.О. Жуков  
І.Є. Григор'єв

## РЕТРОСПЕКТИВНО-КАУЗАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ КАР'ЄРІВ ЯК ОСНОВА РОЗРОБКИ АДАПТИВНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ РЕГІОНАЛЬНИМ ГІРНИЧОДОБУВНИМ КЛАСТЕРОМ

**Мета.** Проведення комплексного аналізу динаміки виробничих показників гірничодобувних підприємств Кривбасу для виявлення закономірностей їх варіативності, визначення ступеня стабільності фактичних режимів гірничих робіт у порівнянні з проектними параметрами, а також обґрунтування практичних підходів до формування адаптивних стратегій управління в умовах ринкової невизначеності.

**Методика.** Використовувався ретроспективний аналіз діяльності гірничодобувних підприємств, із каузальним аналізом умов їх функціонування та економетричним аналізом встановлених показників; методи статистичної обробки даних, системний підхід та порівняльний аналіз для кількісної оцінки стабільності та варіативності виробничих показників гірничодобувних підприємств Кривбасу, виявлення закономірностей їх динаміки та обґрунтування напрямів формування адаптивних стратегій управління.

**Результати.** Проаналізовано динаміку виробничих показників глибоких залізрудних кар'єрів Кривбасу. В ході дослідження встановлено, що середнє відносне відхилення фактичної продуктивності гірничодобувних підприємств сягає 15–37 %, а коефіцієнта розкриття — до 340 %, що свідчить про високу виробничу варіативність. Лише окремі кар'єри, зокрема ПрАТ «ІнГЗК» (11 років стабільної роботи) та кар'єр №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (12 років), демонструють помірну стійкість у дотриманні проектних показників. Для решти підприємств кількість років із допустимим відхиленням продуктивності не перевищує 3–8 за понад 40-річний період. Показано, що підприємства з інтегрованим виробничим циклом мають вищий адаптивний потенціал за рахунок зменшення залежності від зовнішніх чинників. Водночас відкритий ринок, попри розширення можливостей реалізації продукції, створює додаткові ризики: коливання цін, логістичні збої, геополітичну нестабільність. Доведено, що стійкість або нестабільність гірничодобувної системи формується не лише під впливом зовнішніх факторів, а значною мірою залежить від взаємодії її внутрішніх елементів, яка є передумовою проявлення емерджентних властивостей. Це підтверджує необхідність застосування комплексного підходу до оцінки стану та прогнозування роботи підприємств, який враховує не лише показники окремих кар'єрів, але й особливості їх емерджентного взаємозв'язку в межах загальної виробничої системи при розробці адаптивних моделей управління.

**Наукова новизна.** Кількісне обґрунтування рівня виробничої стабільності глибоких залізрудних кар'єрів на основі ретроспективного та економетричного аналізу, а також виявлення емерджентних властивостей гірничодобувної системи.

**Практичне значення** полягає у можливості використання запропонованого підходу – для оцінки виробничої стабільності та прогнозування поведінки гірничодобувних підприємств у динамічному ринковому середовищі, а отриманих економетричних показників – для кількісного обґрунтування адаптивних стратегій управління режимами гірничих робіт з урахуванням внутрішніх резервів системи та зовнішніх економічних ризиків.

**Ключові слова** глибокі кар'єри, продуктивність кар'єру, коефіцієнт розкриття, системний підхід, економетричний аналіз, адаптивне управління виробничою системою.

**Вступ.** У сучасних умовах зростаючої динаміки зовнішнього економічного середовища, що супроводжується високою волатильністю світових цін на мінеральну сировину, підвищення ефективності функціонування гірничодобувних підприємств потребує науково обґрунтованих рішень щодо адаптації виробничих стратегій до змін ринкової кон'юнктури. Особливої актуальності набуває завдання забезпечення стійкості таких великих виробничо-економічних систем як підприємства з відкритого видобутку до невизначеності та варіативності ключових параметрів

господарської діяльності, зокрема обсягів видобутку, якості продукції, продуктивності технологічного обладнання та рівня витрат.

У цьому контексті набуває особливої актуальності виявлення закономірностей функціонування таких підприємств, виявлення відхилень від проектних показників, а також визначення факторів, що мали істотний вплив на техніко-економічні результати. Такий аналіз дозволяє не лише формалізувати історичні тренди, але й забезпечити базу для кількісної оцінки впливу ключових змінних на результати виробництва в сьогоdnішніх умовах.

В подальшому це є необхідною умовою переходу від якісних оцінок до побудови кількісно обґрунтованих залежностей між виробничими параметрами та факторами впливу, що забезпечує підвищення точності прогнозування й обґрунтування оптимізаційних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У межах економічної теорії накопичено значний обсяг досліджень, присвячених аналізу й прогнозуванню динаміки цінкових процесів через ідентифікацію економічних циклів різної тривалості – від довгострокових хвиль тривалістю 45–60 років у циклах Кондратьєва до короткострокових коливань Кітчина тривалістю 3–4 роки. Серед них також виділяють середні цикли Жугляра, що тривають 7–12 років, та цикли Кузнеца по 15–20 років. Крім того, спостерігаються також і галузеві специфічні ритми, властиві, зокрема, гірничодобувній галузі [1].

Аналіз динаміки спотових і ф'ючерсних цін на залізорудну сировину та обсягів світового виробництва сталі у період з 1980 по 2024 рік дозволив кількісно оцінити ступінь їх волатильності [2]. Результати статистичної обробки емпіричних даних засвідчили, що середнє річне стандартне відхилення обсягів випуску сталі становить 4,6 %, тоді як для цін на залізну руду цей показник досягає 27 %.

Проведені наукові дослідження [3] надали цілком обґрунтоване пояснення механізмів формування цінкових процесів, встановили базові причинно-наслідкові взаємозв'язки між ключовими економічними чинниками та виявили закономірності їх взаємодії у динаміці. Окремі роботи [2, 4, 5] присвячені спробам прогнозування поведінки економічних показників з позицій теорії стохастичних процесів із залученням сучасного інструментарію математичного моделювання.

Водночас наявні теоретичні підходи далеко не завжди забезпечують можливість детальної параметризації конкретних виробничих систем, достовірного прогнозування їх розвитку або повного пояснення відхилень та нестандартних ситуацій, що виникають на практиці. Це особливо актуально для гірничодобувної галузі, яка за своєю природою є однією з найбільш складних і варіативних з точки зору

впливу природних і технологічних факторів. Більш того, і світовий ринок мінеральної сировини є олігополістичним, а тому закони циклічності, виявлені у наведених вище дослідженнях, проявляються у вельми модифікованому вигляді. Умови ведення відкритих гірничих робіт постійно змінюються під впливом невизначеностей середовища господарювання, які супроводжують зокрема і підприємства Кривбасу, а це істотно ускладнює процеси управління та прогнозування параметрів їх функціонування [6].

Аналізуючи сучасний стан гірничодобувних підприємств Криворізького залізорудного басейну, необхідно враховувати, що в чи не усіх діючих кар'єрах гірничі роботи вже досягли проектних контурів по верхніх горизонтах. Це свідчить про різночасовий поступовий перехід окремих підприємств до стадії глибокої розробки, що супроводжується зростанням складності виробничих процесів, зниженням техніко-економічних показників та підвищенням витрат. Паралельно з цим, низка підприємств опинилася на межі тимчасової консервації або вже призупинила відкриті гірничі роботи внаслідок несприятливих економічних чинників, зумовлених повномасштабними військовими діями на території України.

Таким чином, проявлені в різній мірі на окремих підприємствах фактори утворюють нові та ускладнюють існуючі зв'язки між різними гірничо-збагачувальними комбінатами і кар'єрами, що входять до їх складу. Подібні зв'язки пропонується розглядати з позицій системного підходу в рамках концепції гірничодобувного кластеру [7]. Це дозволяє спостерігати емерджентні проявлення системи гірничодобувних підприємств регіону, зокрема при встановленні режиму гірничих робіт, виробничої потужності і границь відкритої розробки. Однак проведення подібних досліджень має виконуватись на основі ґрунтового ретроспективного і економетричного аналізу діяльності підприємств галузі.

**Постановка завдання дослідження.** З огляду на сучасні виклики, що постали перед гірничодобувними підприємствами Криворізького залізорудного басейну, зокрема в умовах високої невизначеності

зовнішнього середовища, для адекватного прогнозування поведінки цих виробничих систем виникає об'єктивна необхідність поглибленого аналізу особливостей їх функціонування у ретроспективному аспекті.

У зв'язку з цим метою даного дослідження є проведення ґрунтового каузального, ретроспективного і економетричного аналізу функціонування гірничодобувних підприємств, ґрунтованого на широкій базі даних діяльності підприємств.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

–здійснити систематизацію джерел та підходів щодо ретроспективного аналізу виробничої динаміки гірничодобувних підприємств;

–провести ретроспективний аналіз обсягів видобутку руди і виймання розкривних порід, на основі якого провести каузальний аналіз функціонування підприємств регіону;

–виконати аналіз стабільності та варіативності виробничих показників гірничодобувних підприємств на основі статистичної оцінки відхилень фактичних даних від їх середнього багаторічного значення;

–розробити рекомендації щодо використання результатів проведеного аналізу при формуванні адаптивних стратегій розвитку гірничодобувних підприємств в умовах невизначеності.

**Методи дослідження.** Методи дослідження статті базуються на застосуванні комплексного підходу, що поєднує ретроспективний аналіз статистичних даних гірничодобувних підприємств із каузальним аналізом умов їх функціонування, а також засобами економетричного моделювання. Для оцінювання стабільності та варіативності виробничих параметрів використовувались методи математичної статистики, зокрема розрахунок середніх абсолютних та відносних відхилень, визначення максимальних коливань та аналіз частоти їх перевищення встановлених контрольних меж. Це дозволило кількісно охарактеризувати рівень стійкості обсягів видобутку руди та коефіцієнта розкриття у багаторічному часовому розрізі.

Для оцінки волатильності ціни залізної руди та світового виробництва сталі

залучались стандартні статистичні критерії коливань. Такий методичний підхід дозволив сформуванню аналітичну базу для ґрунтування закономірностей розвитку гірничодобувних підприємств у динамічному середовищі.

### **Виклад основного матеріалу.**

У реаліях пострадянської України гірничодобувні підприємства функціонують в умовах протиставлення двох системних проблем. З одного боку — це висока інерційність гірничодобувних комплексів, обумовлена масштабами родовищ, тривалістю їх розробки та надзвичайно високою капіталоемністю гірничої техніки й обладнання. З іншого боку — це надзвичайно динамічна трансформація світових та регіональних ринків мінеральної сировини, що відбувається під впливом швидких змін у глобальній економіці, політичній ситуації та технологічному розвитку суспільства [8-10].

У гірничій справі зазначена дуальність проблем не лише не нівелюється оперативним управлінням, а, навпаки, загострюється в міру поглиблення гірничих робіт та ускладнення гірничо-геологічних умов. Це особливо актуально з огляду на тривалий життєвий цикл гірничодобувних підприємств, що зазвичай перевищує 40 років.

У сучасних умовах розробка залізородних родовищ України характеризується стабільністю виробничих потужностей гірничодобувних підприємств, сформованих ще у попередній господарській моделі. Такий режим функціонування, ефективний за умов планової соціалістичної економіки, в сучасному динамічному ринковому середовищі дедалі частіше виявляє свою невідповідність новим викликам і вимогам.

Проаналізуємо показники функціонування найпотужніших кар'єрів Кривбасу з огляду ретроспективного контексту їх функціонування.

Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат було створено на базі Інгулецького родовища магнетитових залістих кварцитів, а введення його в експлуатацію відбулося у 1961–1966 роках [11]. Проектна потужність першої черги комбінату становила 18,0 млн тонн сирової руди на рік. У відповідності до вимог планової економіки, у перші десятиліття функціонування

підприємства спостерігалось стабільне нарощування обсягів видобутку та виробничих потужностей (рис. 1).

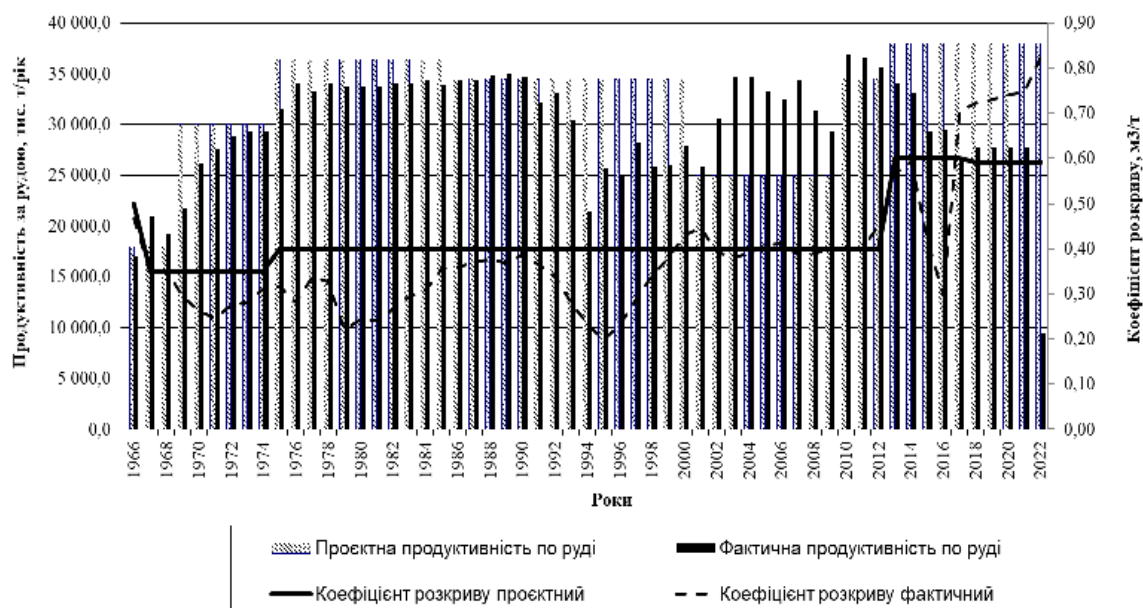


Рис.1. Динаміка виробничих показників Інгулецького ГЗК

У 1980–1991 роках фактична продуктивність ІнГЗК досягла проектних значень і утримувалась на цьому рівні, що було зумовлено високим попитом на залізородну сировину в умовах розвитку металургії СРСР. Натомість у 1991–2000 роках розпад СРСР, економічна криза та трансформаційні процеси в Україні призвели до різкого скорочення видобутку. Це супроводжувалося зростанням коефіцієнта розкриття на фоні нерівномірного фінансування гірничих робіт.

З початку 2000-х років спостерігалась стабілізація роботи підприємства в умовах відновлення попиту на металопродукцію. Водночас фактична продуктивність залишалась нижчою за проектну, що обумовлювалося потребами технічного оновлення та зростанням витрат на розкриття

роботи. Період 2010–2016 років характеризується коливаннями продуктивності, які корелювали з динамікою світових цін на залізну руду, а також із впливом глобальної фінансової кризи та військових дій на сході України. Водночас у ці роки простежується тенденція поступового зростання видобутку, що свідчить про часткову адаптацію комбінату до нових економічних реалій та модернізацію виробничих процесів.

У таблиці 1 наведені результати економетричного аналізу роботи комбінату за роки його існування. Розрахунки показують, що планові показники дотримуються, тобто відхилення становить менше 5%, лише протягом 25% часу функціонування підприємства – протягом 11-14 років.

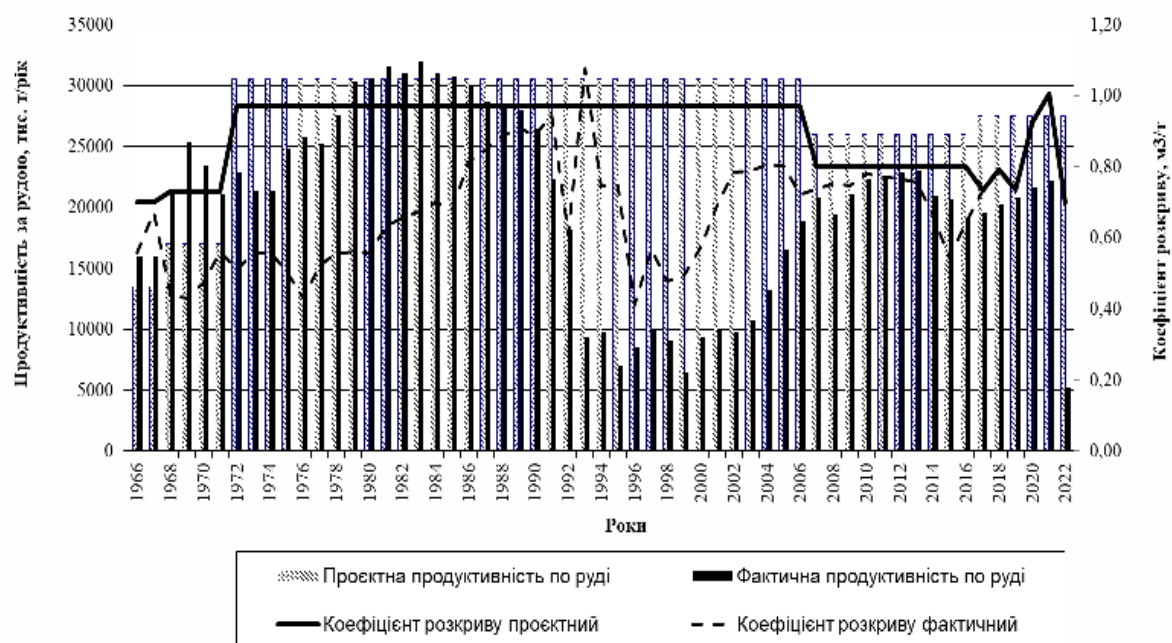
Таблиця 1. Економетричні показники відхилення фактичних значень від проектних для кар'єру Інгулецького ГЗК

Показник	Продуктивність по руді	Коефіцієнт розкриття
Середнє абсолютне відхилення	5109,7 тис. т/рік	0,075 м³/т
Середнє відносне відхилення	15,86 %	17,07 %
Максимальне абсолютне відхилення	28 500 тис. т/рік	0,300 м³/т
Максимальне відносне відхилення	75,00 %	50,00 %
Тривалість роботи з відхиленням менше 5 %	11 років	14 років

Першотравневий кар'єр ПрАТ «Північний ГЗК» функціонує на базі багатих покладів магнетитових залізистих кварцитів Першотравневого родовища, розробка яких розпочалася наприкінці 1960-х – на початку 1970-х років у межах масштабної програми розвитку гірничо-металургійного комплексу тих часів.

Упродовж періоду до 1990 року для підприємства було характерне поступове зростання фактичної продуктивності (рис. 2), яка у окремі роки навіть перевищувала

проектні показники. Це стало можливим завдяки централізованому управлінню, гарантованому державному фінансуванню та стабільному попиту на залізорудну сировину. Відмітною особливістю цього періоду для Першотравневого кар'єру, порівняно з іншими підприємствами регіону, зокрема й ІнГЗК, виступала стабільність коефіцієнта розкриття, що свідчило про дотримання раціональних темпів та послідовності гірничих робіт.



**Рис. 2.** Динаміка виробничих показників Першотравневого кар'єру ПрАТ «Північний ГЗК» [11]

Після 1991 року розвиток підприємства зазнав істотних трансформаційних викликів. Різне скорочення фактичної продуктивності стало наслідком втрати централізованої моделі господарювання, руйнування ринків збуту та загальної економічної нестабільності в Україні. Коефіцієнт розкриття в цей час виявився досить мінливим, що відображає нерівномірне фінансування робіт, епізодичне виконання розкривних заходів та нестабільність у забезпеченні підприємства матеріально-технічними ресурсами.

Починаючи з 2000-х років, на тлі поступового відновлення економіки та стабілізації світового ринку залізорудної сировини, підприємство демонструє тенденцію до зростання фактичної продуктивності. Проте, на відміну від ІнГЗК, навіть у періоди найбільш сприятливої

ринкової кон'юнктури (2007–2013 роки) обсяги видобутку залишалися нижчими за проектні параметри, що є наслідком технологічних та організаційних обмежень, зокрема недостатнього випередження розкривних робіт у попередні періоди.

У 2017–2020 роках діяльність Першотравневого кар'єру частково стабілізувалася, однак нові глобальні виклики – пандемія COVID-19 та повномасштабна війна в Україні – знову зумовили спад продуктивності, що вкотре підтверджує вразливість гірничодобувних підприємств регіону до зовнішніх потрясінь.

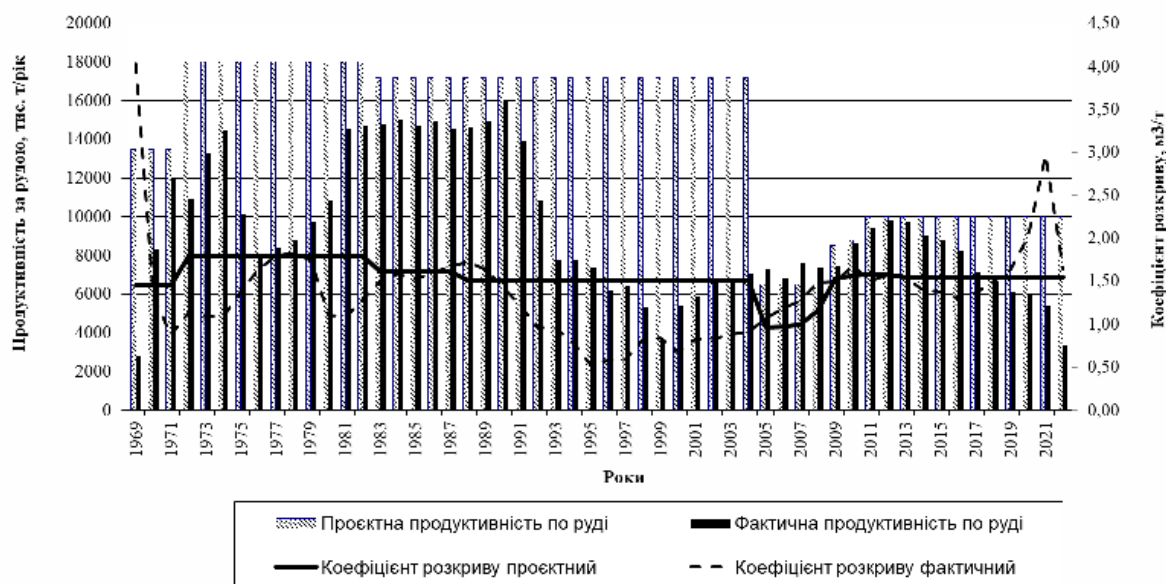
Аналіз економетричних показників роботи кар'єру наведено в таблиці 2. Розрахунки показують ще менше дотримання планових показників – всього протягом 15% строку діяльності даного кар'єру.

**Таблиця 2.** Економетричні показники відхилення фактичних значень від проєктних для Першотравневого кар'єру ПРАТ «Північний ГЗК»

Показник	Продуктивність по руді	Коефіцієнт розкриву
Середнє абсолютне відхилення	8591 тис. т/рік	0,229 м <sup>3</sup> /т
Середнє відносне відхилення	31,44 %	24,71 %
Максимальне абсолютне відхилення	24006 тис. т/рік	0,560 м <sup>3</sup> /т
Максимальне відносне відхилення	100,00 %	57,73 %
Тривалість роботи з відхиленням менше 5 %	8 років	7 років

Ганнівський кар'єр ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» є відносно молодшим об'єктом у системі гірничих робіт ПівнГЗК, однак відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності мінерально-сировинної бази підприємства. Початковий етап його промислової

експлуатації, що припадає на кінець 1960-х – початок 1970-х років, характеризувався помірними темпами нарощування видобутку (рис. 3). Це пояснюється необхідністю поетапного формування інфраструктури та адаптації вже існуючої виробничої системи до специфіки родовища.



**Рис. 3.** Динаміка виробничих показників Ганнівського кар'єру ПРАТ «Північний ГЗК» [11]

У 1973–1990 роках діяльність кар'єру вирізнялася відносною стабільністю видобутку на рівні 8–14 млн тонн руди на рік. Попри те, що фактична продуктивність не досягала проєктних параметрів, її коливання залишалися у прогнорованих межах. При цьому коефіцієнт розкриву переважно утримувався нижче за проєктний, демонструючи помірну варіативність порівняно з іншими кар'єрами комбінату.

Як і для більшості гірничодобувних підприємств України, період 1990-х років став для Ганнівського кар'єру фазою глибокої кризи. Фактична продуктивність за цей час скоротилася майже удвічі, що було наслідком дезінтеграції виробничих

ланцюгів, зниження попиту та дефіциту інвестиційних ресурсів. Паралельно спостерігалось зростання коливань коефіцієнта розкриву, часте його перевищення проєктних рівнів, що вказує на дисбаланс між обсягами розкривних та виймальних робіт.

З початку 2000-х років кар'єр поступово увійшов у фазу стабілізації. Особливо показовим є період після 2006 року, коли фактична продуктивність наблизилася до проєктної, а коефіцієнт розкриву досяг більш сталих та контрольованих значень. На відміну від Першотравневого кар'єру, темпи відновлення виробництва на Ганнівському

кар'єрі були динамічнішими, що свідчить про активну політику управління його розвитком у структурі комбінату.

Період 2010–2020 років загалом характеризувався стабільними обсягами видобутку у межах 12–15 млн тонн руди на рік, однак наприкінці цього етапу на виробничу діяльність підприємства також почали впливати зовнішні фактори кризового характеру.

Результати економетричного аналізу роботи Ганнівського кар'єру, узагальнені у таблиці 3, свідчать про значну нестабільність

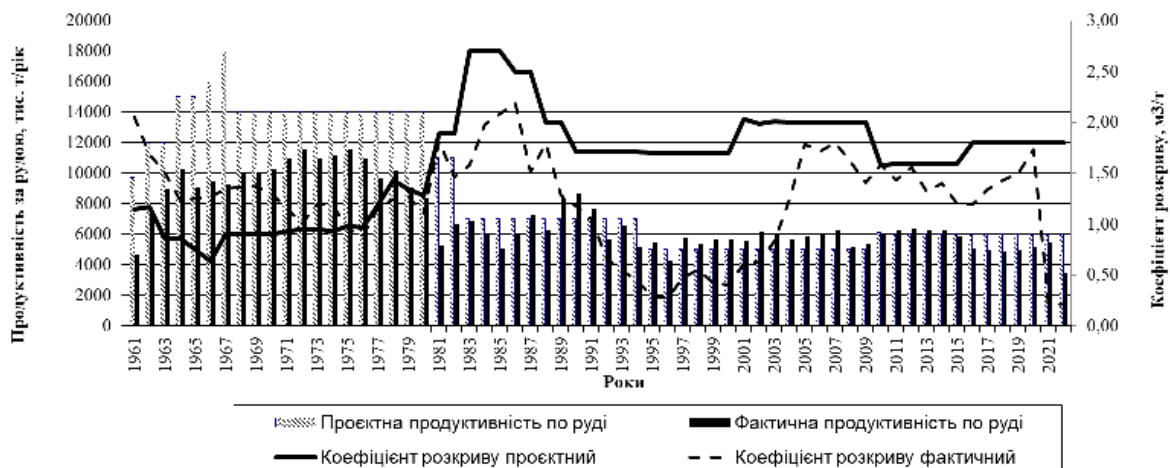
**Таблиця 3.** Економетричні показники відхилення фактичних значень від проєктних для Ганнівського кар'єру ПРАТ «Північний ГЗК»

Показник	Продуктивність по руді	Коефіцієнт розкриву
Середнє абсолютне відхилення	5 158,1 тис. т/рік	0,404 м <sup>3</sup> /т
Середнє відносне відхилення	33,54 %	26,43 %
Максимальне абсолютне відхилення	13 500 тис. т/рік	2,58 м <sup>3</sup> /т
Максимальне відносне відхилення	79,11 %	177,93 %
Тривалість роботи з відхиленням менше 5 %	4 роки	10 років

Глеюватський кар'єр №1 Центрального ГЗК, один із найстаріших у басейні, спочатку характеризувався високими проєктними показниками продуктивності (14–18 млн т/рік), які тривалий час залишалися недосяжними через недостатній розвиток інфраструктури та організаційні обмеження (рис. 4). У 1970-х

основних виробничих показників упродовж усього періоду його експлуатації. Середнє відносне відхилення фактичної продуктивності становить понад 33 %, що перевищує аналогічний показник для Першотравневого кар'єру. Максимальне абсолютне відхилення обсягів видобутку досягло 13,5 млн тонн руди. Ще більшою варіативністю характеризується коефіцієнт розкриву: середнє відхилення становить 0,404 м<sup>3</sup>/т, а максимальне – 2,58 м<sup>3</sup>/т, що вказує на істотні коливання у темпах та послідовності виконання гірничих робіт.

роках спостерігалось тимчасове наближення фактичного видобутку до планових значень, проте з 1980-х років розпочалося стійке падіння продуктивності на фоні зростання коефіцієнта розкриву. Це було наслідком ускладнення гірничо-геологічних умов і досягнення критичних глибин кар'єру.



**Рис. 4.** Динаміка виробничих показників Глеюватського кар'єру №1 ПРАТ «Центральний ГЗК» [11]

Після 1990-х років фактичний видобуток стабілізувався на рівні 5–8 млн т/рік, а різкі флуктуації коефіцієнта розкриву відображали спроби компенсувати дефіцит розкривних робіт, який накопичувався в попередні періоди. З початку 2000-х ситуація

поступово стабілізувалася завдяки перебудові фронтів гірничих робіт та ліквідації розкривної заборгованості, хоча проєктні параметри продуктивності так і залишилися недосяжними через складні гірничо-технічні умови.

Економетричний аналіз роботи Глеюватського кар'єру №1 (таблиця 4) засвідчує помірний, але системний рівень нестабільності у дотриманні проектних параметрів видобутку. Середнє відносне відхилення продуктивності становить 19,68 %, тоді як коефіцієнт розкриття демонструє суттєву волатильність – середнє відхилення 0,594 м<sup>3</sup>/т, максимальне – 1,6 м<sup>3</sup>/т, що в окремі роки означало майже двократне

**Таблиця 4.** Економетричні показники відхилення фактичних значень від проектних для Глеюватського кар'єру №1 ПРАТ «Центральний ГЗК»

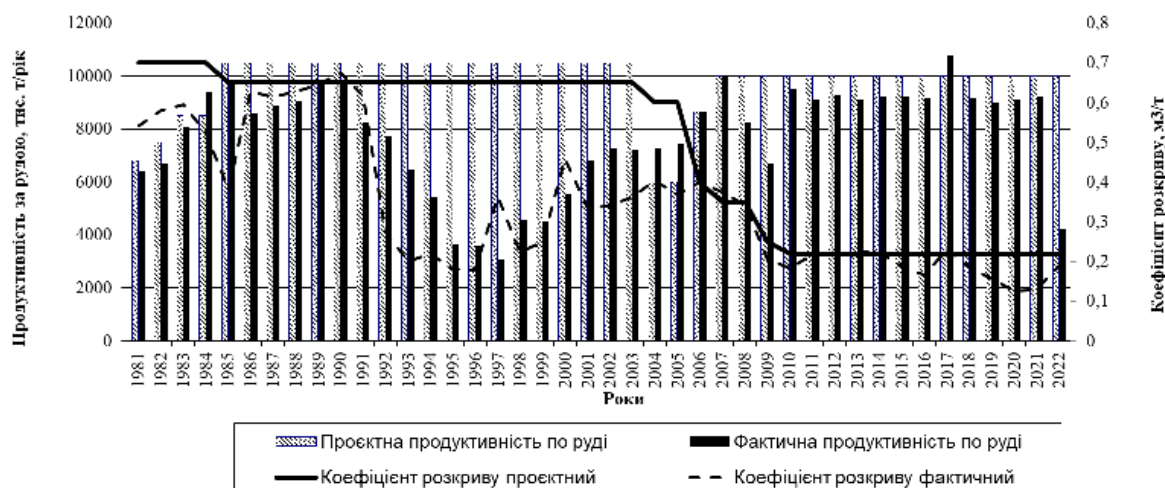
Показник	Продуктивність по руді	Коефіцієнт розкриття
Середнє абсолютне відхилення	2030,5 тис. т/рік	0,594 м <sup>3</sup> /т
Середнє відносне відхилення	19,68 %	37,82 %
Максимальне абсолютне відхилення	8691,2 тис. т/рік	1,60 м <sup>3</sup> /т
Максимальне відносне відхилення	52,03 %	98,44 %
Тривалість роботи з відхиленням менше 5 %	9 років	6 років

Кар'єр №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» введено в експлуатацію у 1981 році. Початковий період роботи, до 1985 року, характеризувався поступовим зростанням фактичної продуктивності, що відображало етап освоєння проектної потужності на рівні 10 млн т руди на рік (рис. 5) [11].

У 1986–1991 роках підприємство досягло стабільної роботи, наблизивши

перевищення обсягів розкриття. Лише 9 років за весь період спостережень характеризуються допустимим відхиленням продуктивності, тоді як стабільний коефіцієнт розкриття спостерігався лише у 6 роках, що свідчить про низьку передбачуваність параметрів гірничих робіт та необхідність удосконалення системи їх планування.

фактичний видобуток і розкриття до проектних значень. Однак після розпаду СРСР (1992–1999) продуктивність різко знизилася, досягнувши мінімумів у середині 1990-х років. Причинами цього стали економічна криза, втрата ринків, дефіцит ресурсів та нестача інвестицій. Коефіцієнт розкриття у цей час коливався хаотично, що свідчило про нерівномірне фінансування розкриття робіт.



**Рис. 5.** Динаміка виробничих показників кар'єру №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

З початку 2000-х до 2008 року простежується поступове відновлення обсягів видобутку на фоні стабілізації ситуації у металургії України та залучення капіталу, включно з іноземними інвестиціями. Одночасно коефіцієнт

розкриття утримувався на помірному рівні – 0,2–0,3 м<sup>3</sup>/т.

Особливістю подальшого розвитку кар'єру №2 стало збереження стабільно високої продуктивності після 2009 року – переважно на рівні 90–95 % від проектної. Це вирізняє його на фоні інших підприємств

галузі та може пояснюватися ефективним управлінням, впровадженням після входження до складу групи «ArcelorMittal». Також зберігався низький коефіцієнт розкриву (приблизно 0,2 м<sup>3</sup>/т), що є наслідком оптимізації головних параметрів кар'єру і параметрів системи розробки.

Загалом динаміка розвитку кар'єру №2 вигідно контрастує з підприємствами групи «Метінвест», демонструючи вищу

**Таблиця 5.** Економетричні показники відхилення фактичних значень від проектних для кар'єру №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Показник	Продуктивність по руді	Коефіцієнт розкриву
Середнє абсолютне відхилення	2244 т/рік	0,147 м <sup>3</sup> /т
Середнє відносне відхилення	22,30 %	26,37 %
Максимальне абсолютне відхилення	7423 т/рік	0,470 м <sup>3</sup> /т
Максимальне відносне відхилення	70,70 %	72,31 %
Тривалість роботи з відхиленням менше 5 %	2 роки	12 років

Аналіз статистичних відхилень підтверджує наявність суттєвого розриву між проектними та фактичними показниками продуктивності кар'єру №2. Середнє абсолютне відхилення за рудою становить 2244 тис. т/рік, що відповідає 22,3 % у відносному вимірі, вказуючи на стійке недовиконання планових обсягів видобутку. Особливо показовим є те, що лише у 2 з 42 років фактична продуктивність перебувала в межах  $\pm 5$  % від проектної, що засвідчує системну відхильність гірничого виробництва від закладених нормативів.

На цьому фоні коефіцієнт розкриву демонструє дещо вищий рівень контрольованості: середнє абсолютне відхилення становить 0,147 м<sup>3</sup>/т (26,37 %), а максимальне — 0,47 м<sup>3</sup>/т (72,31 %). Водночас протягом 12 років цей показник залишався в межах допустимого діапазону, що свідчить про ефективніше управління обсягами розкривних робіт. Така диспропорція між стабільністю коефіцієнта розкриву та варіативністю видобутку вказує на те, що саме етап виймання та загальна виробнича координація залишалися ключовими вузькими місцями в реалізації проектного потенціалу кар'єру.

Аналогічним чином був виконаний ретроспективний, каузальний і економетричний аналіз показників роботи й інших глибоких залізрудних кар'єрів Кривбасу: Петрівського кар'єру №3 і Артемівського кар'єру №4 ПРАТ «ЦГЗК»,

адаптивність до ринкових умов. Це можна пояснити інтегрованою структурою підприємства, де гірничодобувна та металургійна ланки тісно взаємопов'язані в єдиній виробничій системі.

Економетричний аналіз (табл. 5) підтверджує відносно помірну стабільність виробничих показників кар'єру №2, особливо у порівнянні з іншими кар'єрами гірничодобувних підприємств Кривбасу.

кар'єру №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (таблиця 6).

**Обговорення результатів.** Результати економетричного аналізу підтверджують наявність суттєвих просторово-часових відмінностей у динаміці функціонування гірничодобувних підприємств Кривбасу. Ці відмінності зумовлені як об'єктивними факторами (гірничо-геологічні умови, ступінь відпрацьованості запасів), так і суб'єктивними (рівень управлінської адаптації, структура власності, доступ до інвестиційних ресурсів). Такий висновок узгоджується з дослідженням Кім [12], де підкреслено вплив організаційної гнучкості на стабільність гірничих систем.

Зіставні результати зі схожими тенденціями були отримані у дослідженнях Ворелля [13], який аналізував вплив змін у режимі ціноутворення на ринку залізної руди: найбільш стійкими виявляються підприємства з інтегрованою логістикою та централізованою системою прийняття рішень. Це спостерігається у випадку кар'єру №2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», де входження до складу транснаціональної корпорації забезпечило вищу адаптивність і відносну стабільність ключових показників.

У той же час, результати, отримані для Першотравневого, Ганнівського та Глеюватського кар'єрів, узгоджуються з висновками дослідження Мудулі [14], у якому підкреслено, що при відсутності

адаптивного управління та належного фінансування навіть великі підприємства демонструють високу чутливість до зовнішніх збурень. У досліджуваних випадках це проявляється у формі тривалих

фаз нестабільності, значних відхилень від проектних параметрів та нестійкого коефіцієнта розкриття.

**Таблиця 6.** Зведені економетричні показники роботи залізородних кар'єрів Кривбасу

Кар'єр, підприємство	Продуктивність по руді			Коефіцієнт розкриття		
	Середнє відносне відхилення, %	Максимальне відносне відхилення, %	Кількість років з відхиленням менше 5 %	Середнє відносне відхилення, %	Максимальне відносне відхилення, %	Кількість років з відхиленням менше 5 %
Кар'єр ПРАТ «ІнГЗК»	15,9	75,00	11	17,07	50,00	14
Першотравневий кар'єр, ПРАТ «ПівнГЗК»	31,4	100	8	24,71	57,73	7
Ганнівський кар'єр, ПРАТ «ПівнГЗК»	33,5	79,11	4	26,43	177,9	10
Глеюватський кар'єр №1, ПРАТ «ЦГЗК»	19,7	52,03	9	37,82	98,44	6
Петрівський кар'єр №3, ПРАТ «ЦГЗК»	28,0	70	7	30,63	164,5	8
Артемівський кар'єр №4, ПРАТ «ЦГЗК»	31,1	75,56	4	26,39	343,2	3
Кар'єр №2, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	22,3	70,7	2	26,37	72,31	12
Кар'єр №3, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	37,3	74,41	0	30,42	78,89	8

Автори [15] підкреслюють роль доступу до експорту у довгостроковій стійкості гірничодобувних підприємств, а сам експорт залізної руди є чутливим до коливань світових цін, що визначає нестабільність надходжень до бюджету та впливає на макроекономічні показники країни. Це узгоджується з виявленими нами значними коливаннями фактичної продуктивності та коефіцієнтів розкриття на гірничо-збагачувальних комбінатах Кривбасу, які також залежать від світової кон'юнктури. Більш того, автори наголошують, що сировинна орієнтація експорту не сприяє створенню значної кількості робочих місць і не забезпечує стійкого економічного зростання. Даний висновок підтверджує гіпотезу про те, що підприємства максимально широкого виробничого циклу проявляють більшу стійкість та адаптивний потенціал в умовах стохастичних економічних флуктуацій.

Таким чином, отримані дані корелюють із загальними науковими уявленнями про важливість системної керованості та стратегічного планування у

гірничодобувній галузі. Економетричні індикатори, що були застосовані в дослідженні, виявилися ефективними для виявлення зон нестабільності та можуть бути використані для побудови моделей прогнозування та розробки сценаріїв адаптивного управління режимами гірничих робіт в умовах невизначеності.

#### **Висновок.**

Результати виконаного аналізу підтверджують гіпотезу про високу варіативність ключових виробничих показників гірничодобувних підприємств Кривбасу. Найменше середнє відносне відхилення продуктивності по руді виявлено на кар'єрі ПРАТ «ІнГЗК» (15,9 %), тоді як найвищий рівень сукупної нестабільності спостерігається кар'єрах ПРАТ «ЦГЗК», що свідчить про неоднорідність адаптивних можливостей навіть у межах одного підприємства. Аналіз кількості років із відхиленням продуктивності менш ніж 5 % додатково підтверджує цю закономірність: найвищу стабільність демонструють «ІнГЗК» (11 років) та кар'єр №2

«АрселорМіттал Кривий Ріг» (12 років), тоді як для більшості інших підприємств характерні 3–8 стабільних років за більш ніж чотири десятиліття спостережень. Це свідчить про системну нестійкість гірничодобувного виробництва в умовах змінного ринкового середовища.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що важливою умовою забезпечення довготривалої стійкості гірничих підприємств є об'єднання гірничодобувних підприємств у кластери з відповідним розширенням циклу виробництва, в якому видобуток, переробка та збут інтегровані в єдину технологічну і логістичну систему. Така структура підвищує адаптивний потенціал підприємства за рахунок скорочення ланцюгів залежності від зовнішніх суб'єктів, зменшення втрат на стиках технологічних етапів і забезпечення внутрішньої координації оперативних рішень.

У цьому контексті варто враховувати, що функціонування на відкритому ринку, хоча й розширює можливості реалізації продукції, одночасно виступає джерелом додаткових економічних ризиків. Різка зміна світової кон'юнктури, нестабільність логістики, валютні коливання та геополітичні чинники здатні порушити усталені виробничі ланцюги, що особливо критично для підприємств із вузькою спеціалізацією та невисоким рівнем внутрішньої гнучкості.

В подальших дослідженнях особливу увагу слід приділити системному характеру гірничодобувного виробництва, який має ознаки емерджентності: динаміка показників окремих кар'єрів в структурі підприємства і підприємств – в структурі кластеру не може в повній мірі бути пояснена виключно зовнішніми факторами. Стійкість або нестабільність виробничої системи в цілому може виникати як результат взаємодії її складових, навіть за відносної стабільності зовнішніх факторів. Це ще раз підкреслює необхідність використання інтегрованого підходу до оцінки і прогнозування станів гірничих підприємств, який враховує не лише локальні техніко-економічні показники, динамічну поведінку системи в цілому, а й взаємний вплив підприємств кластеру одне на одне.

Результати проведеного ретроспективного, економетричного і

каузального аналізу у поєднанні з системним підходом до оцінки виробничої стабільності будуть використані для розробки стратегії динамічного адаптивного управління в стохастичних умовах.

### Список літератури

1. Пижик М. М., Григор'єв Ю. І. Дослідження впливу динаміки ціни товарної продукції на пріоритет видобування видів корисних копалин при комплексному освоєнні родовищ. Вісник Криворізького національного університету. 2013. Вип. 34. С. 266–270. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu\\_2013\\_34\\_72](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2013_34_72)
2. Lokhman N. V., Beridze T. M., Baranik Z. P., Bugra A. V. Forecasting the value of iron ore raw materials on the basis of statistical time series analysis. Trade and Market of Ukraine. 2024. No. 1(55). P. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.33274/2079-4762-2024-55-1-79-89>
3. Соколовська З. М., Андрієнко В. М., Івченко І. Ю. [та ін.]. Математичне та комп'ютерне моделювання економічних процесів : монографія. Одеса : Астропринт, 2016. 272 с.
4. Dimitrakopoulos R. Advances in applied strategic mine planning. Springer Nature, 2018. (Springer eBooks). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69320-0>
5. Jung D., Baek J., Choi Y. Stochastic predictions of ore production in an underground limestone mine using different probability density functions: a comparative study using big data from ICT system. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, No. 9. P. 4301. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11094301>
6. Cao H., Ma G., Liu P., Qin X., Wu C., Lu J. Multi-factor analysis on the stability of high slopes in open-pit mines. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 10. P. 5940. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13105940>
7. Hryhoriev Y., Lutsenko S., Systierov O., Kutybayev A., Kutybayeva A. Implementation of sustainable development approaches by creating the mining cluster: the case of MPP “Inguletskiy”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254, No. 1. P. 012055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012055>
8. Jung D., Choi Y. Systematic review of machine learning applications in mining: exploration, exploitation, and reclamation. Minerals. 2021. Vol. 11, No. 2. P. 148. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020148>
9. Baek J., Choi Y. Deep neural network for predicting ore production by truck-haulage systems in open-pit mines. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 5. P. 1657. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10051657>
10. Choi Y., Nguyen H., Bui X.-N., Nguyen-Thoi T., Park S. Estimating ore production in open-pit mines using various machine learning algorithms based on a truck-haulage system and support of internet of things. Natural Resources Research. 2020. Vol. 30, No. 2. P. 1141–1173. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09766-5>
11. Луценко С. О., Жуков С. О., Григор'єв Ю. І., Федоренко С. О. Системні невідповідності за традиційного проектування залізородних кар'єрів. Гірничий вісник. Кривий Ріг, 2023. Вип. 111. С. 11–18.
12. Kim Y., Ghosh A., Topal E., Chang P. Performance of different models in iron ore price prediction during the

- time of commodity price spike. *Resources Policy*. 2022. Vol. 80. P. 103237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103237>
13. Wårell L. An analysis of iron ore prices during the latest commodity boom. *Mineral Economics*. 2018. Vol. 31. P. 203–216. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0150-2>
14. Muduli K., Barve A. Establishment of a sustainable development framework in small scale mining supply chains in India. *International Journal of Intelligent Enterprise*. 2013. Vol. 2, No. 1. P. 84–100. DOI: 10.1504/IJIE.2013.057340
15. Полякова Ю. В., Шайда О. Є., Миронова М. І. Економічний розвиток та зовнішня торгівля України. Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Економічні науки. 2022. Вип. 70. С. 94–101. DOI: 10.36477/2522-1205-2022-70-14
- ### References
1. Pyzhyk, M. M., & Hryhoriev, Y. I. (2013). Doslidzhennia vplyvu dynamiky tsiny tovarokoi produktsii na priorytet vydobuvannia vydiv korysnykh kopalyn pry kompleksnomu osvoienni rodovyshch. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, 34, pp. 266–270. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu\\_2013\\_34\\_72](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2013_34_72) (in Ukrainian)
2. Lokhman, N. V., Beridze, T. M., Baranik, Z. R., & Bugra, A. V. (2024). Forecasting the value of iron ore raw materials on the basis of statistical time series analysis. *Trade and market of Ukraine*, 1(55), pp. 79–89. <https://doi.org/10.33274/2079-4762-2024-55-1-79-89> (in English).
3. Sokolovska, Z. M., Andriienko, V. M., Ivchenko, I. Yu., et al. (2016). *Matematychna ta kompiuterne modeliuвання ekonomichnykh protsesiv* [Mathematical and computer modeling of economic processes]. Odesa: Astroprint. 272 p. (in Ukrainian).
4. Dimitrakopoulos, R. (2018). *Advances in applied strategic mine planning*. Springer Nature. (Springer eBooks). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69320-0> (in English).
5. Jung, D., Baek, J., & Choi, Y. (2021). Stochastic predictions of ore production in an underground limestone mine using different probability density functions: a comparative study using big data from ICT system. *Applied Sciences*, 11(9), pp. 4301. <https://doi.org/10.3390/app11094301> (in English).
6. Cao, H., Ma, G., Liu, P., Qin, X., Wu, C., & Lu, J. (2023). Multi-factor analysis on the stability of high slopes in open-pit mines. *Applied Sciences*, 13(10), pp. 5940. <https://doi.org/10.3390/app13105940> (in English).
7. Hryhoriev, Y., Lutsenko, S., Systierov, O., Kuttybayev, A., & Kuttybayeva, A. (2023). Implementation of sustainable development approaches by creating the mining cluster: the case of MPP “Inguletskiy”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), pp. 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012055> (in English).
8. Jung, D., & Choi, Y. (2021). Systematic review of machine learning applications in mining: exploration, exploitation, and reclamation. *Minerals*, 11(2), pp. 148. <https://doi.org/10.3390/min11020148> (in English).
9. Baek, J., & Choi, Y. (2020). Deep neural network for predicting ore production by truck-haulage systems in open-pit mines. *Applied Sciences*, 10(5), pp. 1657. <https://doi.org/10.3390/app10051657> (in English).
10. Choi, Y., Nguyen, H., Bui, X.-N., Nguyen-Thoi, T., & Park, S. (2020). Estimating ore production in open-pit mines using various machine learning algorithms based on a truck-haulage system and support of internet of things. *Natural Resources Research*, 30(2), pp. 1141–1173. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09766-5> (in English).
11. Lutsenko, S. O., Zhukov, S. O., Hryhoriev, Y. I., & Fedorenko, S. O. (2023). Systemni nevidpovidnosti za tradytsiinoho proektuvannia zalizorudnykh karieriv. *Hirnychiy visnyk*, 111, pp. 11–18. (in Ukrainian).
12. Kim, Y., Ghosh, A., Topal, E., & Chang, P. (2022). Performance of different models in iron ore price prediction during the time of commodity price spike. *Resources Policy*, 80, pp. 103237. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103237> (in English).
13. Wårell, L. (2018). An analysis of iron ore prices during the latest commodity boom. *Mineral Economics*, 31, pp. 203–216. <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0150-2> (in English).
14. Muduli, K., & Barve, A. (2013). Establishment of a sustainable development framework in small scale mining supply chains in India. *International Journal of Intelligent Enterprise*, 2(1), pp. 84–100. <https://doi.org/10.1504/IJIE.2013.057340> (in English).
15. Poliakova, Yu. V., Shaída, O. Ye., & Myronova, M. I. (2022). Ekonomichnyi rozvytok ta zovnishna torhivlia Ukrainy. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Ekonomichni nauky*, 70, pp. 94–101. <https://doi.org/10.36477/2522-1205-2022-70-14> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 21.04.2025

Рецензент д-р. техн. наук, О.В. Романенко

**Григор'єв Юліан Ігорович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет (Юридична адреса: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. Фактична адреса: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна).

Email: [yulian.hryhoriev@knu.edu.ua](mailto:yulian.hryhoriev@knu.edu.ua)

**Жуков Сергій Олександрович**, д.т.н., проф., завідувач кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет (Юридична адреса: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. Фактична адреса: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна).

Email: [joukov07@knu.edu.ua](mailto:joukov07@knu.edu.ua)

**Луценко Сергій Олександрович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет (Юридична адреса: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. Фактична адреса: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна).

Email: [lutsenkoserhii@knu.edu.ua](mailto:lutsenkoserhii@knu.edu.ua)

**Григор'єв Ігор Євгенійович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри гірничої справи, ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка» (Юридична адреса: Південне шосе, 80, Запоріжжя, 69008, Україна. Фактична адреса: Південне шосе, 80, Запоріжжя, 69008, Україна).  
**Email:** [ihor.hryhoriev@mipolytech.education](mailto:ihor.hryhoriev@mipolytech.education)

#### RETROSPECTIVE-CAUSAL ANALYSIS OF OPEN-PIT OPERATION AS A BASIS FOR DEVELOPING AN ADAPTIVE MANAGEMENT MODEL FOR A REGIONAL MINING CLUSTER

**Purpose.** *Conducting a comprehensive analysis of the dynamics of production indicators of mining enterprises in Kryvbas to identify patterns of their variability, determine the degree of stability of actual mining operations compared to design parameters, and substantiate practical approaches to the formation of adaptive management strategies in conditions of market uncertainty.*

**Method.** *A retrospective analysis of the activities of mining enterprises was used, with a causal analysis of the conditions of their functioning and an econometric analysis of the established indicators; methods of statistical data processing, a systematic approach and comparative analysis were used to quantitatively assess the stability and variability of production indicators of mining enterprises in Kryvbas, identify patterns in their dynamics and substantiate the directions for forming adaptive management strategies.*

**Results.** *The dynamics of production indicators of deep iron ore pits of Kryvyi Rih were analyzed. The study found that the average relative deviation of the actual productivity of mining enterprises reaches 15–37%, and the overburden ratio - up to 340%, which indicates high production variability. Only some open-pits, in particular PrJSC "InGZK" (11 years of stable operation) and pit No. 2 of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" (12 years), demonstrate moderate stability in meeting design indicators. For the remaining enterprises, the number of years with an acceptable deviation of productivity does not exceed 3–8 over a period of more than 40 years. It is shown that enterprises with an integrated production cycle have a higher adaptive potential due to reduced dependence on external factors. At the same time, the open market, despite the expansion of product sales opportunities, creates additional risks: price fluctuations, logistical failures, geopolitical instability. It is proven that the stability or instability of a mining system is formed not only under the influence of external factors, but largely depends on the interaction of its internal elements, which is a prerequisite for the manifestation of emergent properties. This confirms the need to apply a comprehensive approach to assessing the state and forecasting the work of enterprises, which takes into account not only the indicators of individual open-pits, but also the features of their emergent relationship within the overall production system when developing adaptive management models.*

**Scientific novelty** *The study provides a quantitative justification of the level of production stability of deep iron ore mines based on retrospective and econometric analysis, as well as identification of emergent properties of the mining system.*

**Practical significance** *lies in the possibility of using the proposed approach to assess production stability and predict the behavior of mining enterprises in a dynamic market environment, and the derived econometric indicators enable the quantitative substantiation of adaptive strategies for managing mining operations, taking into account the system's internal reserves and external economic risks.*

**Key words:** *deep open-pits, open-pit productivity, overburden ratio, systems approach, econometric analysis, adaptive production system management.*

**Hryhoriev Yulian**, associate professor of the Open-Pit Mining Department, Kryvyi Rih National University. (Legal address: 11, Vitaly Matusevich str, Kryvyi Rih, Dnipro region, 50027, Ukraine. Actual address: 11, Vitaly Matusevich str, Kryvyi Rih, Dnipro region, 50027, Ukraine).

**E-mail:** [yulian.hryhoriev@knu.edu.ua](mailto:yulian.hryhoriev@knu.edu.ua)

**Serhii Joukov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Open-Pit Mining Department, Kryvyi Rih National University. (Legal address: 11, Vitaly Matusevich str, Kryvyi Rih, Dnipro region, 50027, Ukraine. Actual address: 11, Vitaly Matusevich str, Kryvyi Rih, Dnipro region, 50027, Ukraine).

**E-mail:** [joukov07@knu.edu.ua](mailto:joukov07@knu.edu.ua)

**Serhii Lutsenko**, associate professor of the Open-Pit Mining Department, Kryvyi Rih National University. (Legal address: 11, Vitaly Matusevich str, Kryvyi Rih, Dnipro region, 50027, Ukraine. Actual address: 11, Vitaly Matusevich str, Kryvyi Rih, Dnipro region, 50027, Ukraine).

**E-mail:** [lutsenkoserhii@knu.edu.ua](mailto:lutsenkoserhii@knu.edu.ua)

**Hryhoriev Ihor**, associate professor of the Mining Department, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC. (Legal address: 80, Pivdenne shosse, Zaporizhzhia, Zaporizhzhia region, 69008, Ukraine. Actual address: 80, Pivdenne shosse, Zaporizhzhia, Zaporizhzhia region, 69008, Ukraine).

**E-mail:** [ihor.hryhoriev@mipolytech.education](mailto:ihor.hryhoriev@mipolytech.education)