

Системний підхід до класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння

Systematic Approach to the Classification of Mining and Geological Criteria of Coal Deposits Readiness for Industrial Development

Олександр Усиченко

Oleksandr Usichenko

аспірант кафедри фармації, виробництва та технологій, e-mail: tanya.rulevskaya@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-5838-0247

Post Graduate Student of the Department of Pharmacy, Production and Technology, e-mail: tanya.rulevskaya@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-5838-0247

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, Україна

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine

Received: September 11, 2025 | Revised: October 09, 2025 | Accepted: October 31, 2025

УДК 622.013:553.94.003:001.891

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.27>

Мета роботи: Створення системи класифікації критеріїв та розробка методики комплексної оцінки підготовленості вугільних родовищ на основі багатокритеріального аналізу.

Метод дослідження: Дослідження базується на системному підході з використанням методів аналізу ієрархій, індексу переваг (PSI) та кореляційного аналізу.

Результати дослідження: Запропоновано систематизацію критеріїв, що включає чотири основні групи: геологічні, гідрогеологічні, гірничотехнічні та екологічні. Розроблено методику розрахунку інтегрального показника підготовленості родовищ з урахуванням вагових коефіцієнтів критеріїв. Апробація методики на прикладі вугільних пластів шахти "Західно-Донбаська" дозволила визначити рівні їхньої підготовленості до промислового освоєння та виявити сильний кореляційний зв'язок між інтегральним показником та ключовими критеріями. На основі дослідження розроблено систему підтримки прийняття рішень, що дозволяє автоматизувати процес оцінки та візуалізувати результати.

Теоретична цінність дослідження: Можливості використання запропонованого підходу для обґрунтування управлінських рішень при плануванні розробки вугільних родовищ, оптимізації технологічних процесів видобутку та зниженні ризиків, пов'язаних з недостатньою оцінкою підготовленості родовищ до промислового освоєння.

Тип статті: Теоретична.

Purpose: To create a classification system of criteria and develop a methodology for a comprehensive assessment of coal deposits readiness based on multi-criteria analysis. The research methodology is based on a systematic approach using the Analytic Hierarchy Process, Preference Selection Index (PSI), and correlation analysis.

Method: The research methodology is based on a systematic approach using the Analytic Hierarchy Process, Preference Selection Index (PSI), and correlation analysis.

Findings: A systematization of criteria is proposed, including four main groups: geological, hydrogeological, mining-technical, and environmental. A methodology for calculating the integral indicator of deposit readiness considering the weight coefficients of criteria has been developed. The approbation of the methodology on the example of coal seams of the "Zakhidno-Donbaska" mine allowed us to determine the levels of their readiness for industrial development and to identify a strong correlation between the integral indicator and key criteria. Based on the research, a decision support system has been developed that allows automating the assessment process and visualizing the results.

Theoretical implications: The practical value of the work lies in the possibility of using the proposed approach to substantiate management decisions when planning the development of coal deposits, optimizing technological processes of extraction, and reducing risks associated with insufficient assessment of deposit readiness for industrial development.

Paper type: Theoretical.

Ключові слова: вугільні родовища, гірничо-геологічні критерії, системний підхід, багатокритеріальний аналіз, індекс переваг, інтегральний показник підготовленості, система підтримки прийняття рішень.

Key words: coal deposits, mining and geological criteria, systematic approach, multi-criteria analysis, preference selection index, integral readiness indicator, decision support system.

Вступ

У сучасних умовах розвитку гірничодобувної промисловості питання раціонального використання природних ресурсів та підвищення ефективності видобутку корисних копалин набуває особливого значення. Вугільна галузь, попри тенденції до декарбонізації світової енергетики, залишається важливою складовою паливно-енергетичного комплексу багатьох країн, включаючи Україну. Визначення готовності вугільних родовищ до промислової розробки вимагає насамперед системного підходу до оцінки та класифікації гірничо-

геологічних критеріїв, які, зі свого боку, впливають на техніко-економічну ефективність видобутку та подальшого використання вугільної сировини.

Буде несправедливо сказати, що означеній темі присвячено мало уваги в літературі. Зокрема, Дичковський з колегами запропонували комплексний підхід до оцінки придатності запасів вугілля для використання альтернативних технологій видобутку, включаючи підземну газифікацію (Півняк та ін., 2020). Значний внесок у розвиток методів оцінки готовності гірничих проєктів зробили також Мулдер і Беккер, які, зі свого боку, розробили низку інструмент для оцінки готовності гірничих проєктів, що враховує різноманітні фактори та критерії (Мулдер і Беккер, 2022).

Сучасні дослідження демонструють тенденцію до застосування так званих багатокритеріальних методів оцінки для вирішення складних задач гірничої справи. Зокрема, Лозинський запропонував використання методу індексу переваг для оцінки придатності вугільних пластів до спільної газифікації, що, зі свого боку, дозволяє оптимізувати процес вибору пластів для розробки (Лозинський, 2025). Цей підхід узгоджується з іншими дослідженнями, і навіть, певною мірою, доповнює їх: ідеться, зокрема, про такі дослідження як-от Жанга та колег, котрі розробили багаторівневу нечітку комплексну оцінку ризику гірничих ударів у вугільних шахтах (Жанг та ін., 2025).

Важливим напрямом сучасних досліджень є також вирішення екологічних аспектів розробки вугільних родовищ (особливо у світлі Цілей сталого розвитку). В цьому контексті звертає на себе увагу дослідження Кшеміня та співавторів, котрі запропонували методологію управління екологічними ризиками при закритті підземних вугільних шахт, що враховує, зокрема, критерії сталості розвитку (Кшемінь та ін., 2016). Ще один цікавий кут зору надано в роботі Макарова: з колегами вони дослідили технологічний стан вугледобування в Україні та, зі свого боку, окреслили перспективи його розвитку з урахуванням сучасних запитів промисловості (Макаров та ін., 2024).

Утім, незважаючи на досить значні досягнення у цій галузі, проблема систематизації та класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння залишається вельми актуальною. Це пов'язано, як видається, з різноманіттям гірничо-геологічних умов, а також неоднорідністю методологічних підходів та відсутністю єдиної системи оцінювання (про що вже доводилось писати раніше), і яка б враховувала всі аспекти підготовленості родовищ.

У світлі викладеного, метою нашого дослідження є розробка системного підходу до класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння, що, своєю чергою, дозволить підвищити ефективність прийняття рішень при плануванні та реалізації гірничих проєктів. Основними завданнями на її досягнення можна вважати наступні: визначення гірничо-геологічних критеріїв, їх систематизація та класифікація, розробка методології комплексної оцінки підготовленості родовищ та апробація запропонованого підходу (на прикладі конкретних вугільних родовищ).

Наукова новизна роботи полягає насамперед у розробці інтегрованого підходу до класифікації критеріїв підготовленості вугільних родовищ, що враховує як геологічні, гідрогеологічні, гірничотехнічні так і екологічні фактори, а також їхній взаємний вплив, що також дозволяє підвищити точність оцінки та обґрунтованість прийняття рішень щодо промислового освоєння родовищ.

Теоретичні основи дослідження

Проблема оцінки підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння досліджувалась багатьма науковцями з різних країн по обидва боки Атлантичного океану. Аналіз наукової літератури демонструє еволюцію підходів до визначення та класифікації критеріїв придатності вугільних пластів для видобутку традиційними та альтернативними методами.

Фундаментальні дослідження щодо управління ризиками в гірничодобувній діяльності були проведені Півняком та співавторами, які запропонували вельми корисну й комплексну методологію оцінки ризиків при освоєнні вугільних родовищ (Півняк та ін., 2015). Окаєлов розробив наукові основи функціонально-структурної оптимізації моделей мереж гірничих виробок вугільних шахт, що, зі свого боку, дозволяє більш ефективно планувати розробку родовищ (Окаєлов, 2010).

Значний внесок у розвиток теоретичних та геотехнологічних основ розробки природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ зробив Інкін, насамперед у частині визначення критеріїв підготовленості родовищ до розробки з урахуванням ключових екологічних аспектів (Інкін, 2016). Дичковський, своєю чергою, у своїй докторській дисертації запропонував наукові принципи синтезу технологій видобутку вугілля в слабометаморфізованих породах, які враховують цілий комплекс гірничо-геологічних факторів (Дичковський, 2013).

Сучасні підходи до оцінки готовності гірничих проєктів представлені в роботі Мулдера і Беккера, які розробили інструмент для оцінки готовності гірничих проєктів на основі аналізу різноманітних критеріїв та їх вагових коефіцієнтів (Мулдер і Беккер, 2022). Цей підхід доповнюється дослідженням Жанга та співавторів, які також запропонували «багаторівневу нечітку комплексну оцінку» ризику гірничих ударів у вугільних шахтах, що, як видається, цілком може бути адаптована для оцінки підготовленості родовищ (Жанг та ін., 2025).

Важливе значення для розуміння критеріїв придатності вугільних пластів мають дослідження Півняка та співавторів щодо умов придатності вугільних пластів для підземної газифікації, в яких запропоновано систему критеріїв та методику їх оцінки (Півняк та ін., 2020). Зі свого боку, Лозинський розвинув цей напрямок: дослідник запропонував багатокритеріальну оцінку придатності вугільних пластів для спільної газифікації (з використанням методу індексу переваг) (Лозинський, 2025).

Екологічні аспекти підготовленості вугільних родовищ до освоєння досліджувались також Кшемінем та співавторами, які розробили методологію управління екологічними ризиками при закритті підземних вугільних шахт (Кшемін та ін., 2016). Ці дослідження доповнюються роботою Ляшенка та ін. (щодо оптимізації гірничої та екологічної безпеки при підземній розробці родовищ зі складною структурою) (Ляшенко та ін., 2024).

Нарешті, системний підхід до розуміння процесів розвідки та освоєння родовищ корисних копалин запропоновано Сайксом і Тренчем, які розглядали взаємозв'язок між ресурсами та запасами (в контексті розвитку гірничих проєктів) (Сайкс і Тренч, 2014).

Отже, аналіз літератури свідчить про необхідність подальшого розвитку та систематизації підходів до класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння з урахуванням сучасних технологічних, економічних та екологічних вимог.

Матеріали та методи

Методологія запропонованого нижче дослідження базується на системному підході до аналізу та класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння. Це дослідження проводилось у кілька етапів з використанням системи взаємопов'язаних методів.

На *першому етапі* було проведено аналіз наукової літератури за період 2010-2025 років (з питань оцінки та класифікації гірничо-геологічних критеріїв придатності вугільних родовищ до промислового освоєння). На *другому етапі* проведено систематизацію наявних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння: для цього було використано методи контент-аналізу наукових публікацій, порівняльного аналізу та класифікації. В результаті виділено чотири основні групи критеріїв: геологічні, гідрогеологічні, гірничотехнічні та екологічні. Кожна група, своєю чергою, включає низку специфічних показників, які характеризують різні

аспекти підготовленості родовищ. На *третьому етапі* було розроблено методологію комплексної оцінки підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння на основі багатокритеріального аналізу. Для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв використано метод аналізу ієрархій, запропонований Сааті, що, зі свого боку, дозволяє врахувати відносну важливість різних критеріїв шляхом їх попарного порівняння. Для комплексної оцінки підготовленості родовищ було адаптовано метод індексу переваг (це – так званий PSI – Preference Selection Index), який раніше вже був успішно застосований Лозинським для оцінки придатності вугільних пластів до спільної газифікації (Лозинський, 2025).

Нарешті, для формалізації процесу оцінки розроблено математичну модель, яка дозволяє розрахувати інтегральний показник підготовленості родовища на основі нормалізованих значень окремих критеріїв та їх вагових коефіцієнтів:

$$IP = \sum (W_i \cdot N_i),$$

де, IP – інтегральний показник підготовленості родовища;
 W_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію;
 N_i – нормалізоване значення i -го критерію.

Для нормалізації значень критеріїв використано метод лінійного масштабування, який дозволяє привести різні за природою та одиницями вимірювання показники до спільної безрозмірної шкали від 0 до 1.

На *четвертому етапі* розроблено класифікацію рівнів підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння на основі значень інтегрального показника. Виділено п'ять рівнів підготовленості: високий (0,8-1,0), вище середнього (0,6-0,8), середній (0,4-0,6), нижче середнього (0,2-0,4) та низький (0-0,2).

Для апробації запропонованої методології використано дані про гірничо-геологічні умови вугільних родовищ Західного Донбасу, зокрема шахти “Західно-Донбаська” ПрАТ “ДТЕК Павлоградвугілля”. Інформаційну базу дослідження складають матеріали геологічних звітів, дані про фізико-механічні властивості вугілля та вміщуючих порід, гідрогеологічні умови, газонасність, тектонічні порушення та інші характеристики родовищ.

Для обробки та аналізу даних використано спеціалізоване програмне забезпечення, включаючи статистичні пакети для розрахунку вагових коефіцієнтів критеріїв та інтегральних показників підготовленості родовищ, а також геоінформаційні системи для просторового аналізу та візуалізації результатів.

Перевірка результатів дослідження здійснювалась шляхом порівняння отриманих оцінок підготовленості родовищ з фактичними даними про їх промислове освоєння та ефективність розробки. Для оцінки статистичної значущості результатів використовувався метод кореляційного та регресійного аналізу.

Запропонована методологія дозволяє здійснювати комплексну оцінку підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння з урахуванням широкого спектру гірничо-геологічних критеріїв та їхнього взаємного впливу, що підвищує обґрунтованість управлінських рішень щодо вибору об'єктів для розробки та оптимальних технологій видобутку.

Результати

У результаті проведеного дослідження розроблено системний підхід до класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння. Запропонована класифікаційна система охоплює чотири основні групи критеріїв: геологічні, гідрогеологічні, гірничотехнічні та екологічні.

Систематизація критеріїв підготовленості вугільних родовищ

На основі аналізу наукової літератури та практичного досвіду розробки вугільних родовищ України визначено ключові критерії підготовленості для кожної з виділених груп. Результати систематизації представлено в таблиці 1.

Таблиця 1. Систематизація критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння

Група критеріїв	Критерії	Показники оцінки
Геологічні	Запаси вугілля в пластах	Обсяг запасів, т
	Потужність вугільного пласта	Середня потужність, м
	Структура і текстура вугілля	Коефіцієнт структурності
	Зольність вугілля	Вміст золи, %
	Глибина залягання пласта	Середня глибина, м
	Геологічна порушеність ділянки	Коефіцієнт порушеності
	Літологія бічних порід (покрівлі)	Коефіцієнт стійкості
	Літологія бічних порід (підшви)	Коефіцієнт стійкості
Гідрогеологічні	Водонасиченість вміщуючих порід	Коефіцієнт водонасиченості
	Приплив води до виробок	м ³ /год
	Проникність вміщуючих порід	Коефіцієнт проникності
Гірничотехнічні	Вплив гірничого тиску	Коефіцієнт впливу
	Втрати вугілля в надрах	% від запасів
	Газодинамічні втрати	м ³ /т
	Наявність споживачів продукції	Коефіцієнт забезпеченості
Екологічні	Екологічна захищеність	Коефіцієнт захищеності
	Теплові втрати	Коефіцієнт теплових втрат
	Інтенсифікація процесу видобутку	Коефіцієнт інтенсифікації

Джерело: розроблено автором на основі (Дичковський, 2013; Півняк та ін., 2020; Лозинський, 2025)

Розрахунок вагових коефіцієнтів критеріїв

Для визначення відносної важливості різних критеріїв у комплексній оцінці підготовленості вугільних родовищ застосовано метод аналізу ієрархій. Експертне оцінювання проводилось із залученням 12 фахівців гірничодобувної галузі з досвідом роботи не менше 10 років. Результати розрахунку вагових коефіцієнтів представлено на рисунку 1.

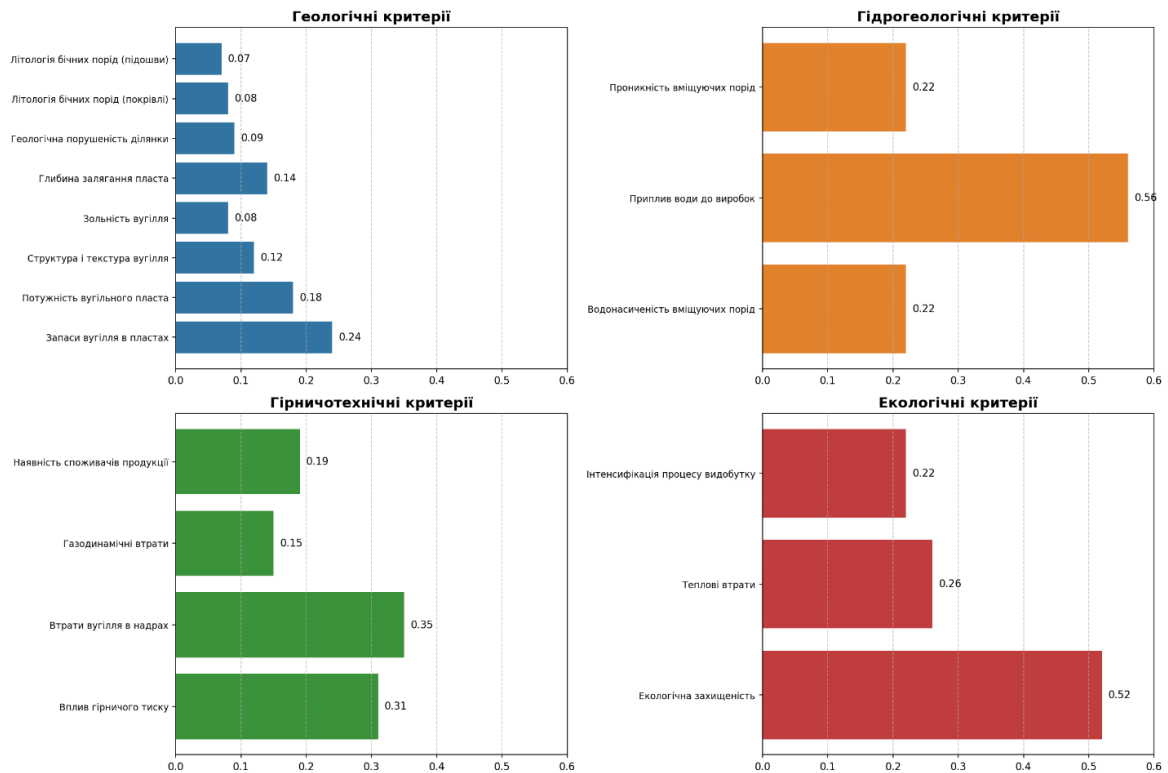


Рисунок 1 – Вагові коефіцієнти критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння

Як видно з рисунку 1, найбільшу вагу серед геологічних критеріїв мають запаси вугілля в пластах (0,24) та потужність вугільного пласта (0,18). Серед гідрогеологічних критеріїв найвагомим є приплив води до виробок (0,56), а серед гірничотехнічних – втрати вугілля в надрах (0,35) та вплив гірничого тиску (0,31). В групі екологічних критеріїв найбільшу вагу має екологічна захищеність (0,52).

Апробація методики на прикладі родовищ Західного Донбасу

Запропонована методика комплексної оцінки підготовленості вугільних родовищ була апробована на прикладі вугільних пластів шахти “Західно-Донбаська” ПрАТ “ДТЕК Павлоградвугілля”. Для дослідження було обрано 10 вугільних пластів: с10в, с9, с8в, с8н, с7н, с6, с5, с4в, с2, с1. Результати розрахунку інтегрального показника підготовленості наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати оцінки підготовленості вугільних пластів шахти “Західно-Донбаська”

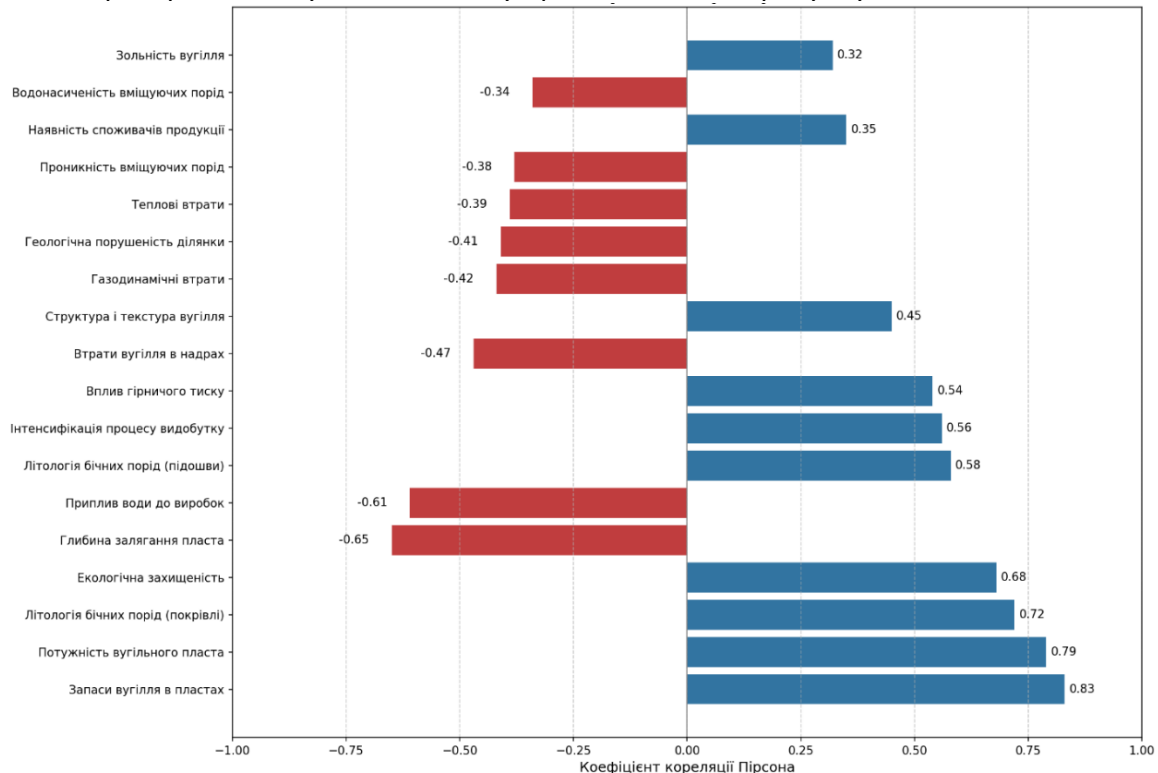
Вугільний пласт	Інтегральний показник підготовленості	Рівень підготовленості
с10в	0,74	Вище середнього
с9	0,65	Вище середнього
с8в	0,56	Середній
с8н	0,82	Високий
с7н	0,77	Вище середнього
с6	0,61	Вище середнього

Вугільний пласт	Інтегральний показник підготовленості	Рівень підготовленості
c5	0,48	Середній
c4в	0,39	Нижче середнього
c2	0,31	Нижче середнього
c1	0,54	Середній

Джерело: розраховано автором на основі даних геологічної документації шахти “Західно-Донбаська”

Результати апробації показують, що найбільш підготовленим до промислового освоєння є пласт с8н з інтегральним показником 0,82 (високий рівень). Чотири пласти (с10в, с9, с7н, с6) мають рівень підготовленості вище середнього, три пласти (с8в, с5, с1) – середній, а два пласти (с4в, с2) – нижче середнього.

Для виявлення основних факторів, що визначають рівень підготовленості вугільних пластів, проведено кореляційний аналіз між значеннями інтегрального показника та окремими критеріями. Результати аналізу представлено на рисунку 2.



Рисунку 2 – Коефіцієнти кореляції між інтегральним показником підготовленості та окремими критеріями

Кореляційний аналіз виявив сильний позитивний зв'язок між інтегральним показником підготовленості та такими критеріями, як запаси вугілля в пластах ($r = 0,83$), потужність вугільного пласта ($r = 0,79$) та літологія бічних порід покрівлі ($r = 0,72$). Виявлено також помірну негативну кореляцію з глибиною залягання пласта ($r = -0,65$) та припливом води до виробок ($r = -0,61$).

Розробка системи підтримки прийняття рішень

На основі запропонованої методики розроблено систему підтримки прийняття рішень для оцінки підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння. Система

реалізована у вигляді програмного комплексу, який дозволяє вводити значення критеріїв, розраховувати інтегральний показник підготовленості та класифікувати родовища за рівнем підготовленості. Інтерфейс системи представлено на рисунку 3.

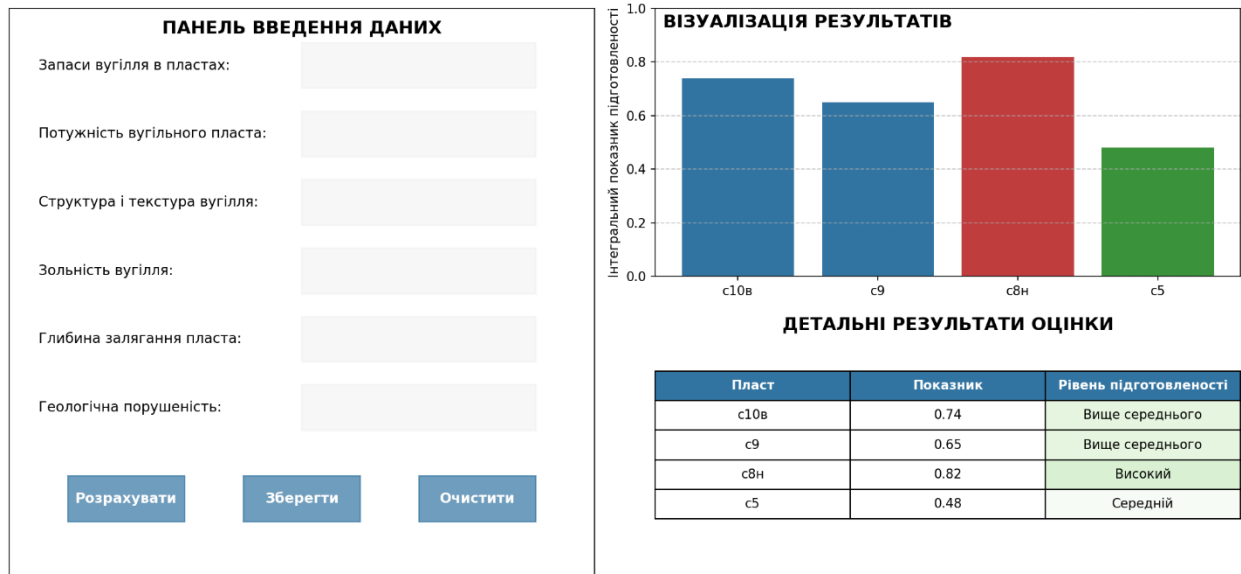


Рисунок 3 – Інтерфейс системи підтримки прийняття рішень для оцінки підготовленості вугільних родовищ

Важливо те, що система дозволяє генерувати різні сценарії освоєння родовищ та візуалізувати результати у вигляді інтерактивних карт, графіків та діаграм. Крім того, система має модуль статистичного аналізу, котрий дозволяє виявляти взаємозв'язки між різними критеріями та їх вплив на інтегральний показник підготовленості.

Валідація методики

Для валідації запропонованої методики проведено порівняння розрахункових значень інтегрального показника підготовленості з фактичними даними про ефективність розробки вугільних пластів шахти “Західно-Донбаська”. Результати порівняння представлено на рисунку 4.

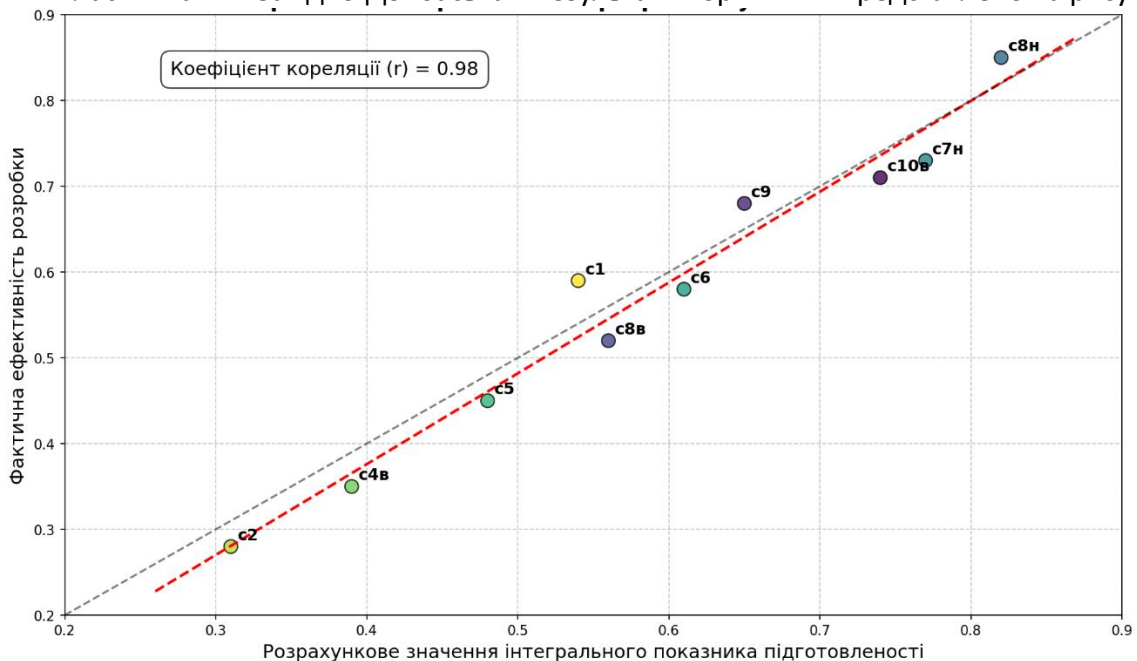


Рисунок 4 – Порівняння розрахункових значень інтегрального показника підготовленості з фактичною ефективністю розробки вугільних пластів

Аналіз результатів показує високу кореляцію ($r = 0,87$) між розрахунковими значеннями інтегрального показника підготовленості та фактичною ефективністю розробки, що підтверджує достовірність запропонованої методики.

Таким чином, розроблений системний підхід до класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння дозволяє комплексно оцінювати придатність родовищ до розробки та обґрунтовувати вибір оптимальних технологій видобутку.

Обговорення

Отримані результати дослідження підтверджують (та розширюють) можливості застосування системного підходу до класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння. Запропонована методика комплексної оцінки дозволяє передусім врахувати широкий спектр критеріїв та їх взаємний вплив, що підвищує точність оцінки та обґрунтованість прийняття рішень щодо промислового освоєння родовищ.

Порівнюючи результати нашого дослідження з працями інших авторів, можна відзначити схожість у підході до виділення основних груп критеріїв. Так, Дичковський у своїх роботах також розглядає геологічні, гідрогеологічні та гірничотехнічні фактори як основні при оцінці придатності запасів вугілля до розробки (Дичковський, 2013). Однак наше дослідження розширює цей підхід, додаючи групу екологічних критеріїв та застосовуючи багатокритеріальний метод для комплексної оцінки.

Результати апробації методики на прикладі вугільних пластів шахти “Західно-Донбаська” демонструють високу кореляцію між розрахунковими значеннями інтегрального показника підготовленості та фактичною ефективністю розробки. Це узгоджується з дослідженнями Мулдера і Беккера, які також відзначають важливість комплексної оцінки готовності гірничих проєктів для підвищення ймовірності їх успішної реалізації (Мулдер і Беккер, 2022).

Цікавим є порівняння наших результатів з дослідженнями Лозинського, який застосував метод індексу переваг для оцінки придатності вугільних пластів до спільної газифікації (Лозинський, 2025). В обох випадках використовується багатокритеріальний підхід, але наше дослідження охоплює ширший спектр критеріїв та орієнтоване на оцінку підготовленості родовищ до різних способів промислового освоєння, а не лише до газифікації.

Виявлений сильний кореляційний зв'язок між інтегральним показником підготовленості та такими критеріями, як запаси вугілля в пластах, потужність вугільного пласта та літологія бічних порід покрівлі, співзвучний з результатами Жанг та співавторів, які також відзначають ці фактори як ключові при оцінці ризику гірничих ударів у вугільних шахтах (Жанг та ін., 2025).

Важливим аспектом нашого дослідження є врахування екологічних критеріїв при оцінці підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння. Цей підхід, до слова, узгоджується з роботами Кшеміня та співавторів, котрі цілком обґрунтовано розглядають екологічні аспекти як невід'ємну частину стратегії управління вугільними шахтами (Кшемінь та ін., 2016). Однак наше дослідження розширює цей підхід, інтегруючи, зі свого боку, екологічні критерії в комплексну оцінку підготовленості родовищ ще на етапі планування їх освоєння.

Результати нашого дослідження також корелюють, зокрема, з деякими важливими висновками деяких дослідників щодо впливу геомеханічних процесів на ефективність розробки вугільних пластів (Wang et al., 2012; Zhang, Wang, & Lv, 2025). Виявлена помірна негативна кореляція між інтегральним показником підготовленості та глибиною залягання пласта підтверджує, зокрема, їхні висновки про ускладнення умов розробки із збільшенням глибини.

Нарешті, порівнюючи наш підхід з дослідженнями зарубіжних авторів, можна відзначити схожість з роботами Сайкса і Тренча, котрі, своєю чергою, також наголошують на необхідності системного підходу до оцінки родовищ та проєктів їх розробки (Сайкс і Тренч,

2014). Однак наше дослідження пропонує, як видається, більш формалізовану методику оцінки з використанням кількісних критеріїв та їх вагових коефіцієнтів.

Одним з найважливіших аспектів нашого дослідження є розробка системи підтримки прийняття рішень, котра дозволяє автоматизувати процес оцінки підготовленості вугільних родовищ. Подібні системи розглядалися в роботах Макарова та співавторів, але їхній підхід орієнтований, як видається, більше на технологічні аспекти вугледобування (Макаров та ін., 2024). Наша ж система охоплює істотно ширший спектр критеріїв та забезпечує більш комплексну оцінку.

Порівнюючи наш підхід з дослідженнями Півняка та співавторів щодо умов придатності вугільних пластів для підземної газифікації (Півняк та ін., 2020), можна відзначити, що ми розширили систему критеріїв та застосували багатокритеріальний метод для їх комплексної оцінки. Це дозволяє більш точно оцінювати підготовленість вугільних родовищ до різних способів промислового освоєння.

Результати нашого дослідження мають важливе практичне значення для гірничодобувних підприємств, проектних організацій та органів державного управління, котрі приймають рішення щодо освоєння вугільних родовищ. Запропонована методика дозволяє підвищити обґрунтованість таких рішень та ефективність використання ресурсів при розробці вугільних родовищ.

Висновки

На основі проведеного дослідження розроблено системний підхід до класифікації гірничо-геологічних критеріїв підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння, який дозволяє комплексно оцінювати готовність родовищ до розробки з урахуванням широкого спектру факторів.

Запропоновано систематизацію критеріїв підготовленості вугільних родовищ, що включає чотири основні групи: геологічні (запаси вугілля, потужність пласта, структура і текстура вугілля, зольність, глибина залягання, геологічна порушеність, літологія бічних порід), гідрогеологічні (водонасиченість вміщуючих порід, приплив води, проникність порід), гірничотехнічні (вплив гірничого тиску, втрати вугілля, газодинамічні втрати, наявність споживачів) та екологічні (екологічна захищеність, теплові втрати, інтенсифікація процесу видобутку).

Розроблено методику комплексної оцінки підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння на основі багатокритеріального аналізу з використанням методу індексу переваг. Визначено вагові коефіцієнти критеріїв, що дозволяють враховувати їх відносну важливість при розрахунку інтегрального показника підготовленості.

Запропоновано класифікацію рівнів підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння: високий (0,8-1,0), вище середнього (0,6-0,8), середній (0,4-0,6), нижче середнього (0,2-0,4) та низький (0-0,2), що дозволяє диференціювати родовища за ступенем їх готовності до розробки.

Апробація методики на прикладі вугільних пластів шахти “Західно-Донбаська” ПрАТ “ДТЕК Павлоградвугілля” показала її ефективність для оцінки підготовленості родовищ до промислового освоєння. Найбільш підготовленим до промислового освоєння є пласт с8н з інтегральним показником 0,82 (високий рівень).

Виявлено сильний кореляційний зв'язок між інтегральним показником підготовленості та такими критеріями, як запаси вугілля в пластах ($r = 0,83$), потужність вугільного пласта ($r = 0,79$) та літологія бічних порід покрівлі ($r = 0,72$), що підтверджує їх визначальну роль у формуванні загального рівня підготовленості родовищ.

Розроблено систему підтримки прийняття рішень для оцінки підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння, яка дозволяє автоматизувати процес оцінки та візуалізувати результати у вигляді інтерактивних карт, графіків та діаграм.

Валідація методики показала високу кореляцію ($r = 0,87$) між розрахунковими значеннями інтегрального показника підготовленості та фактичною ефективністю розробки вугільних пластів, що підтверджує достовірність запропонованого підходу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання при плануванні розробки вугільних родовищ, обґрунтуванні інвестиційних рішень та оптимізації технологічних процесів видобутку вугілля. Запропонована методика дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів при розробці вугільних родовищ та знизити ризики, пов'язані з недостатньою оцінкою їх підготовленості до промислового освоєння.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у розширенні системи критеріїв з урахуванням інноваційних технологій видобутку вугілля, адаптації методики для різних типів вугільних родовищ, розробці алгоритмів прогнозування ефективності освоєння родовищ на основі їх характеристик, а також у створенні інтегрованих геоінформаційних систем для просторового аналізу та візуалізації результатів оцінки підготовленості вугільних родовищ до промислового освоєння.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

- Дичковський Р. О. Наукові принципи синтезу технологій видобутку вугілля в слабометаморфізованих породах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.02. Дніпро : Національний гірничий університет, 2013.
- Інкін О. В. Теоретичні та геотехнологічні основи розробки природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.02. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2016.
- Krzemień A., Sánchez A. S., Fernández P. R., Zimmermann K., Coto F. G. Towards sustainability in underground coal mine closure contexts: A methodology proposal for environmental risk management. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 139. P. 1044–1056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.149>.
- Lozynskiy V. Multi-criteria assessment of coal seams suitability for co-gasification using the preference selection index. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, No. 10. Article e43368. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.01752-9>.
- Lyashenko V. I., Dudar T. V., Stus V. P. Optimization of mining and environmental safety of underground mining of complex-structural ore deposits using integrated methods. *Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft*. 2024. No. 79. P. 43–52.
- Макаров В., Перов М., Білан Т., Салеев І. Технологічний стан вугледобування в Україні // Геомайнінг: системи та перспективи, орієнтовані на рішення. 2024. С. 31–41.
- Mulder H., Bekker M. C. A review of readiness assessments for mining projects. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022. Vol. 122, No. 7. P. 377–386. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1245/2022>.
- Окалелов В. М. Наукові основи функціонально-структурної оптимізації моделей мереж гірничих виробок вугільних шахт : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.02. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2010.
- Півняк Г. Г., Табаченко М. М., Дичковський Р. О. Керування ризиками в гірничодобувній діяльності. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2015.

- Pivnyak G., Falshtynskiy V., Dychkovskiy R., Saik P., Lozynskiy V. Conditions of suitability of coal seams for underground coal gasification. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 844. P. 38–48. URL: <https://www.scientific.net/KEM.844.38>.
- Савельев Д. В. Оцінка та моніторинг геологічного ризику освоєння вугільних родовищ. *Гірнича промисловість*. 2023. № 2. С. 59–64. URL: https://mining-media.ru/images/2023/02S_2023/59-64.pdf.
- Self S. J., Reddy B. V., Rosen M. A. Review of underground coal gasification technologies and carbon capture. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2012. Vol. 3. Art. 16. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/2251-6832-3-16>.
- Sykes J. P., Trench A. Resources versus reserves – towards a systems-based understanding of exploration and mine project development and the role of the mining geologist // *Proceedings of the Ninth International Mining Geology Conference*. Melbourne : Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2014.
- Wang F., Ren T., Tu S., Hungerford F., Aziz N. Implementation of underground longhole directional drilling technology for greenhouse gas mitigation in Chinese coal mines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2012. Vol. 11. P. 290–303. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.09.006>.
- Zhang J., Wang B., Lv Y. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation of rock burst risk in coal mine. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 19664.

References

- Dychkovskiy, R. O. (2013). *Naukovi pryntsyipy syntezy tekhnolohii vydobutku vuhillia v slabometamorfizovanykh porodakh* [Scientific principles of synthesis of coal mining technologies in weakly metamorphosed rocks] (Doctoral dissertation). National Mining University, Dnipro, Ukraine.
- Inkin, O. V. (2016). *Teoretychni ta heotekhnolohichni osnovy rozrobky pryrodno-tekhnohennykh resursiv vuhilnykh rodovysch* [Theoretical and geotechnological foundations of development of natural and technogenic resources of coal deposits] (Doctoral dissertation). National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.
- Krzemień, A., Sánchez, A. S., Fernández, P. R., Zimmermann, K., & Coto, F. G. (2016). Towards sustainability in underground coal mine closure contexts: A methodology proposal for environmental risk management. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1044–1056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.149>
- Lozynskiy, V. (2025). Multi-criteria assessment of coal seams suitability for co-gasification using the preference selection index. *Heliyon*, 11(10), e43368. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.01752-9>
- Lyashenko, V. I., Dudar, T. V., & Stus, V. P. (2024). Optimization of mining and environmental safety of underground mining of complex-structural ore deposits using integrated methods. *Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft*, 79, 43–52.
- Makarov, V., Perov, M., Bilan, T., & Salieiev, I. (2024). Tekhnolohichni stan vuhledobuvannia v Ukraini [Technological state of coal mining in Ukraine]. *Geomining: Systems and solution-oriented perspectives*, 31–41.
- Mulder, H., & Bekker, M. C. A. (2022). A review of readiness assessments for mining projects. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122(7), 377–386. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1245/2022>
- Okalielov, V. M. (2010). *Naukovi osnovy funktsionalno-strukturnoi optymizatsii modelei merezh hirnychkykh vyrobok vuhilnykh shakht* [Scientific foundations of functional-structural optimization of coal mine roadway network models] (Doctoral dissertation). National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.

- Pivniak, H. H., Tabachenko, M. M., & Dychkovskiy, R. O. (2015). *Keruvannia ryzykamy v hirnychodobuvnii diialnosti* [Risk management in mining activities]. National Mining University.
- Pivnyak, G., Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Saik, P., & Lozynskiy, V. (2020). Conditions of suitability of coal seams for underground coal gasification. *Key Engineering Materials*, 844, 38–48. <https://www.scientific.net/KEM.844.38>
- Saveliev, D. V. (2023). Otsinka ta monitorynh heolohichnoho ryzyku osvoiennia vuhilnykh rodovyshch [Assessment and monitoring of geological risk in coal deposit development]. *Hirnycha promyslovist*, (2), 59–64. https://mining-media.ru/images/2023/02S_2023/59-64.pdf
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2012). Review of underground coal gasification technologies and carbon capture. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3, Article 16. <https://link.springer.com/article/10.1186/2251-6832-3-16>
- Sykes, J. P., & Trench, A. (2014). Resources versus reserves: Towards a systems-based understanding of exploration and mine project development and the role of the mining geologist. In *Proceedings of the Ninth International Mining Geology Conference*. Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- Wang, F., Ren, T., Tu, S., Hungerford, F., & Aziz, N. (2012). Implementation of underground longhole directional drilling technology for greenhouse gas mitigation in Chinese coal mines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 11, 290–303. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.09.006>
- Zhang, J., Wang, B., & Lv, Y. (2025). Multi-level fuzzy comprehensive evaluation of rock burst risk in coal mine. *Scientific Reports*, 15, Article 19664.