

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., А. А. ГАПОНЕНКО,
І. А. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники, О. Ю. СЕРДЮК, асист.
Криворізький національний університет

ОПЕРАТИВНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ГЕОЛОГО-МІНЕРАЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ОСНОВІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Метою дослідження є підвищення точності ультразвукового каротажу для визначення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи на основі значень швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнту загасання ультразвуку на основній частоті та вищих гармоніках, а також співвідношення цих параметрів.

Методи дослідження. Метод визначення геолого-мінералогічних різновидів гірських порід на основі оцінки змін швидкості поширення поздовжніх та поперечних об'ємних ультразвукових хвиль, співвідношення цих величин у контрольованому середовищі, а також параметр, що характеризує ступінь нелінійності цього процесу – величину загасання ультразвуку на основній та вищих гармоніках.

Наукова новизна. Встановлено, що для ідентифікації геолого-мінералогічних різновидів залізорудної сировини можуть бути використані оцінки змін швидкості поширення поздовжніх та поперечних об'ємних ультразвукових хвиль, співвідношення цих величин у контрольованому середовищі, а також параметр, що характеризує ступінь нелінійності цього процесу – величину загасання ультразвуку на основній і вищих гармоніках.

Практичне значення. Результати виконаних досліджень показали, що найбільш ефективним для вирішення поставленої задачі виявився метод Fuzzy C-Shape, за допомогою якого ідентифіковано геолого-мінералогічні різновиди залізорудної сировини із вірогідністю 0,91%.

Результати. У гірських породах швидкості поширення пружних хвиль змінюються в широкому діапазоні і залежать від фізичних властивостей, структури, текстури, стану та інших внутрішніх і зовнішніх факторів. Швидкості поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль у гірських породах визначаються їх пружними характеристиками: швидкість поздовжніх хвиль зростає зі збільшенням модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона. Швидкість поширення пружних хвиль в гірських породах визначається їх пружними властивостями та густиною. Ця швидкість практично не залежить від довжини хвилі, що дозволяє використовувати для досліджень хвилі з будь-якими частотами коливань.

Пропонований метод на основі результатів ультразвукових вимірювань характеристик гірських порід і нечіткого логічного висновку дозволяє з високим ступенем точності ідентифікувати мінералого-технологічні різновиди руди в гірському масиві в початковій стадії технологічного процесу її видобутку і переробки, порівняти їх відповідного технологічного регламенту, а також технологічних агрегатів і тим самим забезпечує досягнення заданих показників гірничозбагачувального переділу з урахуванням вимог охорони навколишнього середовища та енергоефективності.

Ключові слова: геолого-мінералогічні різновиди, гірська порода, ультразвукові вимірювання, каротаж свердловин.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-3-9

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Балансові запаси залізної руди в Україні становлять понад 30 млрд. т, що забезпечить роботу підприємств гірничо-металургійної галузі ще приблизно століття. З десяти найбільших залізрудних підприємств України сім розташовані в Криворізькому регіоні і забезпечують більше 90% потреб металургійних підприємств України у сировині [1,2].

У цілому залізні руди представлені трьома основними різновидами [3]: багаті мартитові, залістисті кварцити і бурі залізнякаи. Залістисті кварцити, які є основним резервом розвитку сировинної бази Криворізького басейну, відносяться до скелюватської геолого-промислового типу. Залежно від наявності тих чи інших шарів, магнетитові залістисті кварцити поділяються на ряд різновидів, кожен з яких має різну технологічну цінність: магнетитові кварцити, які майже не містять силікатів і карбонатів; силікатно-магнетитові кварцити, що мають певну кількість силікатних шарів; гематит-залізослюдково-магнетитові кварцити, що мають певну кількість гематитових шарів; магнетит-силікатні кварцити, що мають певну кількість магнетитових шарів, бідні кварцити, що знаходяться на межі промислового значення; карбонат-магнетитові кварцити; силікат-карбонат, або карбонат-силікатні магнетитові кварцити.

Ефективність роботи гірничодобувних та гірничопереробних підприємств залежить від того наскільки точно і своєчасно вони отримують інформацію стосовно геолого-мінералогічних

різновидів залізорудної сировини, яка видобувається чи поступає на переробку. Для отримання інформації про геолого-мінералогічні різновиди залізорудної сировини застосовують методи геофізичних досліджень із застосуванням різноманітних вимірювань властивостей гірських порід, а також використовується супутні дані, які отримуються в процесі виконання різноманітних технологічних операцій, наприклад при бурінні свердловин.

Аналіз досліджень і публікацій. У дослідженнях [4, 5] запропоновано підхід до статичної оптимізації процесів буріння у контексті видобутку і перероблення руди, проте недостатньо уваги приділено динамічним процесам, що виникають безпосередньо у процесі буріння свердловини. У праці [6] вказано, що достатнім динамічним показником, що характеризує властивості породи, є механічна швидкість буріння. Недоліком такого підходу є те, що в умовах складної геологічної структури залізорудних родовищ даного показника недостатньо і потрібен аналіз більшого числа змінних, що підтверджують результати досліджень [7, 8].

Визначати тип породи у процесі буріння за двома показниками: є механічна швидкість буріння і крутний момент закупінропоновано у роботі [8]. Недоліком такого підходу те, що досягнення необхідної точності розпізнавання різновид породи можливе в умовах бінарної геологічної структури, оскільки вказані параметри достатньо точно вказують на гомогенність і міцність гірської породи. За наявності декількох мінералого-технологічних різновидів застосування даного підходу буде ускладненим.

У праці [9] для моніторингу процесу буріння використано такі параметри: горизонтальні і вертикальні вібрації, осьовий тиск, крутний момент, швидкість буріння, швидкість обертання тощо. Недоліком даного підходу можна вважати те, що у переліку контрольованих параметрів наявні лише параметри бурової установки і не здійснюється пряме чи непряме вимірювання характеристик породи, що буриться. Аналогічний підхід використано у роботі [10] для розпізнавання тернарної геологічної структури – з наявністю трьох різновидів породи, що буриться. Однак, як і у попередній роботі розпізнавання різновидів породи головним чином здійснювалось за одним показником (міцністю) та за параметрами бурильної установки без вимірювання характеристик самої породи.

Перспективним напрямком щодо оперативного визначення геолого-мінералогічних різновидів залізорудної сировини є ультразвукові вимірювання. Ультразвуковий каротаж заснований на використанні параметрів розповсюдження пружних хвиль в досліджуваному середовищі для визначення його фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик [11,12]. Акустичні хвилі в твердих тілах можна розділити на об'ємні, поверхневі, хвилеводні і каналізовані. Об'ємні акустичні хвилі поширюються у всьому об'єму твердого тіла. Однією з ознак, за яким їх розрізняють між собою, є форма фронту хвилі [13,14]. Вони бувають плоскими, сферичними, циліндричними тощо. Іншою ознакою служить напрямок вектору зсуву часток середовища, за цією ознакою розрізняють об'ємні, поздовжні і об'ємні поперечні хвилі. Поверхневі акустичні хвилі поширюються поблизу вільної поверхні твердого тіла або поблизу поверхні розділу двох різних середовищ [15]. Їх фазова швидкість направлена паралельно цій поверхні, а інтенсивність швидко зменшується з глибиною проникнення в об'єм твердого тіла. Хвилеводні акустичні хвилі можуть існувати в стрижнях і тонких шарах, як в хвилеводах, а каналізовані - у виступах або канавках різного профілю на поверхні твердого тіла - як у каналах.

Постановка завдання. Метою виконаних досліджень є підвищення точності ультразвукового каротажу для визначення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи на основі значень швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнту загасання ультразвуку на основній частоті та вищих гармоніках, а також співвідношення цих параметрів.

Викладення матеріалу і результати. Розглянемо метод визначення геолого-мінералогічних різновидів гірських порід на основі оцінки змін швидкості поширення поздовжніх та поперечних об'ємних ультразвукових хвиль, співвідношення цих величин у контрольованому середовищі, а також параметр, що характеризує ступінь нелінійності цього процесу – величину загасання ультразвуку на основній та вищих гармоніках.

У гірських породах швидкості поширення пружних хвиль змінюються в широкому діапазоні і залежать від фізичних властивостей, структури, текстури, стану та інших внутрішніх і зовнішніх факторів. Визначити швидкості поширення пружних хвиль в необмеженому пруж-

ному середовищі можна за формулами, виведеним з хвильових рівнянь [16,17]. Швидкість позовжньої хвилі в масиві

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (1)$$

де ρ – густина середовища, E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона.

Швидкість поширення поперечної хвилі

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2)$$

де G – модуль зсуву.

Відношення швидкості позовжніх хвиль до швидкості поперечних є функцією тільки коефіцієнта Пуассона гірської породи

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{2 \cdot \frac{1-\nu}{1-2\nu}}. \quad (3)$$

Швидкості поширення пружних хвиль у породах суттєво змінюються в залежності від мінерального складу, густини, пористості, зернистості і інших параметрів. Їх значення збільшуються від кислих інтрузивних порід до основних і ультраосновних. У вивержених порід помітно зменшення значень швидкостей поширення пружних хвиль із збільшенням вмісту SiO_2 . У породах основного складу швидкості позовжніх хвиль в інтрузивних зразках в середньому на 20% вище, ніж в ефузивних. З підвищенням кислотності ця різниця зменшується. У швидкостей поширення поперечних хвиль такий зв'язок не спостерігається [18,19]. Значення швидкостей поширення позовжніх і поперечних пружних хвиль для магматичних і метаморфічних порід лінійно пов'язані з густиною. Для осадових порід такі закономірності не встановлені. Значення швидкостей пружних хвиль змінюються у зв'язку з варіаціями структурно-текстурних характеристик порід в різних місцях відбору проб для випробувань. Так, коефіцієнт варіації швидкостей позовжніх хвиль у порід, взятих з одного родовища, складає: у глин до 40%, у вапняків і доломіту до 25%. Розподіл значень швидкостей пружних хвиль у більшості магматичних і метаморфічних порід підпорядковується нормальному закону [19,20].

У табл. 1 наведені статистичні характеристики пружних якостей найбільш поширених гірських порід та швидкостей розповсюдження в них ультразвукових хвиль.

Таблиця 1

Статистичні характеристики пружних якостей найбільш поширених гірських порід та швидкості розповсюдження в них ультразвукових хвиль

Parameters	Min	Max	Mean	Median	Variance	Standard Deviation
C_L , m/s	4450,0000	6320,0000	5562,2222	5930,0000	556094,4444	745,7174
C_T , m/s	2780,0000	3370,0000	3123,3333	3140,0000	40175,0000	200,4370
ρ , g/cm ³	2,5200	2,9600	2,7211	2,7000	0,0187	0,1366
E , kg/mm ²	4870,0000	8770,0000	6833,3333	7240,0000	1625825,0000	1275,0784
μ , kg/mm ²	2060,0000	3340,0000	2706,6667	2760,0000	178600,0000	422,6109
σ	0,1800	0,3200	0,2582	0,3050	0,0040	0,0636

Швидкості позовжніх та поперечних ультразвукових хвиль у гірських породах визначаються їх пружними характеристиками (рис. 1 та 2): швидкість позовжніх хвиль зростає зі збільшенням модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона; зміна коефіцієнта Пуассона від 0,1 до 0,4 збільшує швидкість позовжньої хвилі приблизно на 45%; швидкість поперечних хвиль зі збільшенням модуля Юнга зростає, але зменшується з ростом коефіцієнта Пуассона.

Таким чином, швидкість поширення пружних хвиль в гірських породах визначається їх пружними властивостями та густиною. Ця швидкість практично не залежить від довжини хвилі, що дозволяє використовувати для досліджень хвилі з будь-якими частотами коливань.

На відміну від швидкості поширення пружних хвиль, фізична дисперсія яких у більшості порід практично відсутня, коефіцієнт загасання визначається частотою пружних коливань. У широкому діапазоні частот – від 1 Гц до 10 МГц коефіцієнт загасання α у різних гірських порід змінюється від $1 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$. Декремент загасання в цьому ж діапазоні частот у середньому змінюється від $1 \cdot 10^{-2}$ до 1,0.

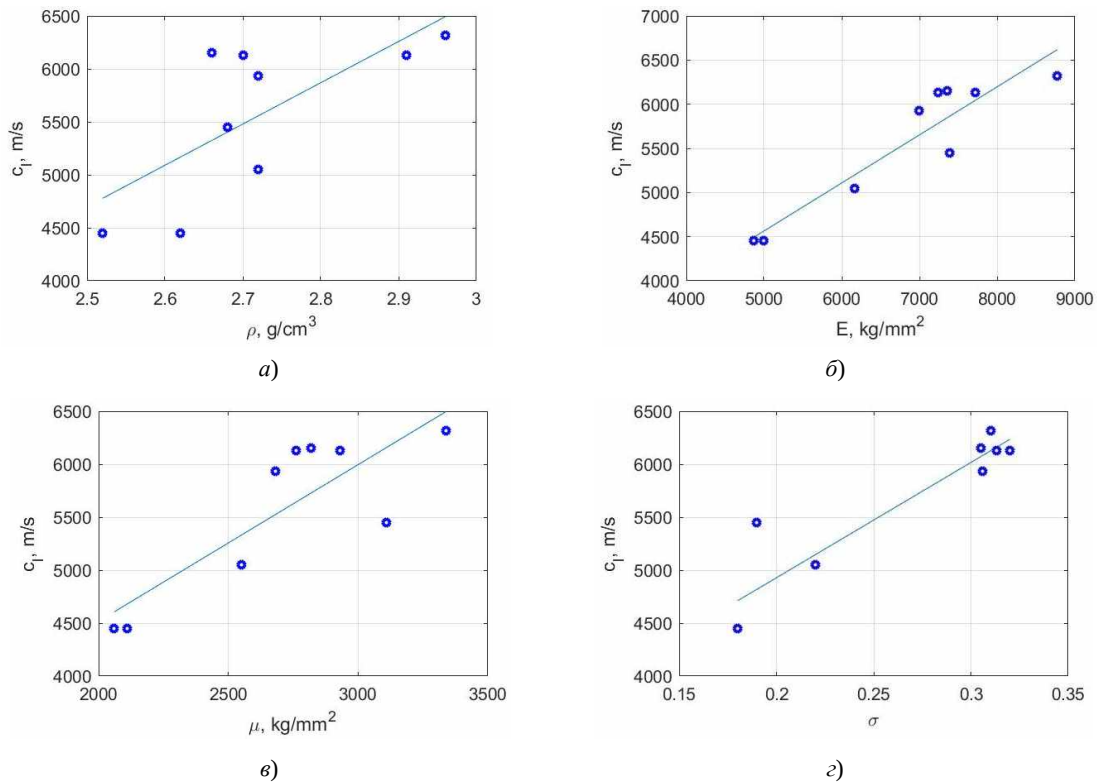


Рис. 1. Залежність швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль від характеристик гірських порід

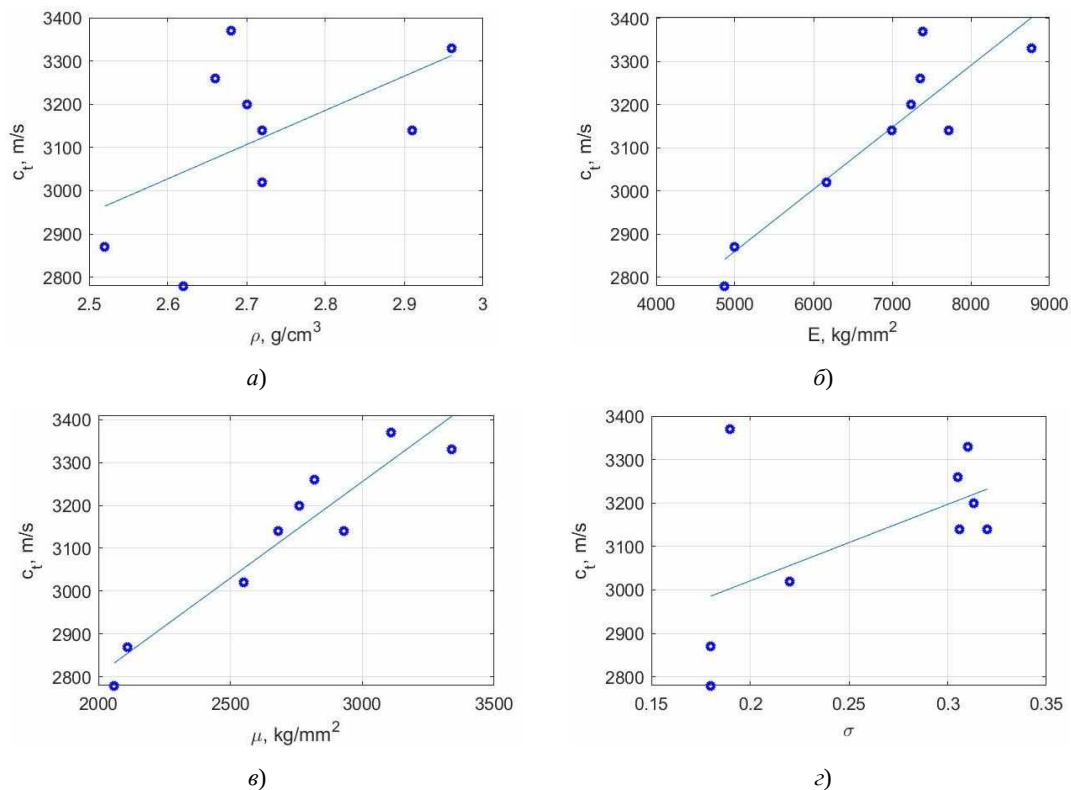


Рис. 2. Залежність швидкості поперечних ультразвукових хвиль від характеристик гірських порід

Коефіцієнт загасання збільшується зі зростанням частоти. Однак чітко вираженої однозначної функціональної залежності загасання від частоти для порід не встановлено. Наприклад, у гранітів у інтервалі частот від 10 до 1000 кГц найкраща апроксимація спостерігається при описі частотної залежності квадратичною функцією $\alpha = m f^2$, де m - коефіцієнт пропорційності. У габро-діабазів, кварцитів, граніто-гнейсів, піщаників, сланців і інших порід частотна залежність в

інтервалі від 500 до 5000 кГц підкоряється закону $\alpha = A_1 f + A_2 f^2$. Така залежність спостерігається як для поздовжніх, так і для поперечних хвиль [17].

У табл. 2 наведено статистичні характеристики пружних якостей найбільш поширених гірських порід та згасання в них ультразвукових хвиль.

Таблиця 2

Статистичні характеристики пружних якостей найбільш поширених гірських порід, швидкості розповсюдження та згасання в них ультразвукових хвиль

Parameters	Min	Max	Mean	Median	Variance	Standard Deviation
α , dB/m	4,0000	71,0000	35,6250	35,5000	563,1250	23,7303
C_L , m/s	4144,0000	5714,0000	4768,8750	4620,0000	401339,5536	633,5137
C_T , m/s	2343,0000	2857,0000	2652,6250	2731,0000	40868,5536	202,1597
ρ , g/cm ³	2600,0000	3055,0000	2753,5000	2705,0000	25693,4286	160,2917
E , kg/mm ²	34,4400	59,8700	47,7438	47,9350	97,2451	9,8613
σ	0,1500	0,3300	0,2588	0,2650	0,0036	0,0601

У табл. 3 зведено результати розрахунків кореляційних зв'язків основних параметрів процесу розповсюдження ультразвукових хвиль в гірських породах з урахуванням згасання.

Таблиця 3

Кореляційні зв'язки основних параметрів процесу розповсюдження ультразвукових хвиль у гірських породах з урахуванням згасання

Parameters	α , dB/m	C_L/C_T	C_L , m/s	C_T , m/s	ρ , g/cm ³	E , kg/mm ²	σ
α , dB/m	1,0000	0,0200	0,1905	0,3328	0,5132	0,3582	-0,1356
C_L/C_T	0,0200	1,0000	0,8379	0,2815	0,6962	0,6273	0,9732
C_L , m/s	0,1905	0,8379	1,0000	0,7591	0,6393	0,9130	0,7743
C_T , m/s	0,3328	0,2815	0,7591	1,0000	0,3105	0,8623	0,2014
ρ , g/cm ³	0,5132	0,6962	0,6393	0,3105	1,0000	0,6514	0,6670
E , kg/mm ²	0,3582	0,6273	0,9130	0,8623	0,6514	1,0000	0,5697
σ	-0,1356	0,9732	0,7743	0,2014	0,6670	0,5697	1,0000

У кристалічних порід коефіцієнт загасання поперечних хвиль зазвичай дорівнює коефіцієнту загасання поздовжніх хвиль або приблизно в 1,5-2 рази перевищує його. У вологих глин і водонасичених пісків спостерігається значна різниця в коефіцієнтах згасання поперечних і поздовжніх хвиль (до 5 і більше) [17]. Слід зазначити, що у випадку коли швидкості поширення пружних хвиль у багатьох міцних монолітних породах змінюються на 40-60% – їх коефіцієнти загасання змінюються у 2-4 рази. Отже, це свідчить про те, що коефіцієнт загасання пружних хвиль є більш чутливим параметром для якісної характеристики гірських порід, ніж швидкість ультразвуку. Разом з тим цей фактор призводить до залежності загасання ультразвукових коливань, які розповсюджуються у досліджуваному середовищі, від різноманітних збурюючих факторів, таких, як зміни чи порушення його структури.

Проаналізуємо характеристики 7-ми типів руд, які видобуваються та надходять на переробку з одного із родовищ Криворізького залізорудного басейну (табл. 4). У табл. 4 цьому прийнято такі позначення типів руд [3,14]: 1 – магнетитові роговики; 2 – силікат-карбонат-магнетитові роговики; 3 – червоносмугасті магнетитові та гематит-магнетитові роговики; 4 – напівокислені та окислені роговики; 5 – силікатні сланці, безрудні роговики та кварці; 6 – магнетит-силікат-карбонатні (бідні) роговики; 7 – гематит-магнетитові роговики.

Таблиця 4

Результати аналізу різновидів руд

Різновид	Кварц, %	Магнетит, %	Мартит, %	Гематит, %	Сидерит, %	Густина, кг/м ³
1	63,7	30,9	0	1,4	3,8	3431
2	68,4	21,7	0	0,4	9,1	3248
3	64,5	30,2	0	1,5	3,8	3414
4	65,4	24,4	3,3	3,7	3,2	3412
5	74,6	4,5	0	0,7	20,2	2989
6	75,2	6,8	0	0,8	17,2	3009
7	60,8	31,4	0	5,4	2,5	3530

Дані, які застосовуються для ідентифікації мінералого-технологічних різновидів залізної руди методами чіткої і нечіткої кластеризації є спостереженнями фізичного процесу розповсюдження ультразвукових хвиль у досліджуваному середовищі. Кожне спостереження складається з n виміряних змінних, згрупованих у n -вимірний вектор-рядок

$$x_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}]^T, x_k \in R^n. \quad (4)$$

Набір N спостережень позначають

$$X = \{x_k | k = 1, 2, \dots, N\}, \quad (5)$$

і представляють у вигляді матриці $N \times n$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \dots & x_{Nn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Досліджувались методи чіткої кластеризації K-Means та K-Medoid; нечіткий алгоритм Fuzzy C-Means; метод Густафсона-Кесселя - розширений стандартний алгоритм нечітких C-means, який використовує адаптивну норму відстані; метод Гаса-Гева - алгоритм кластеризації нечіткого максимуму правдоподібностей, який використовує норму відстані на основі нечітких оцінок максимальної правдоподібності; метод Fuzzy C-Shape, який замінює норму внутрішнього добутку в моделі Fuzzy C-Means функцією відстані на основі форми. Результати виконаних досліджень показали, що найбільш ефективним для вирішення поставленої задачі виявився метод Fuzzy C-Shape, за допомогою якого ідентифіковано геолого-мінералогічні різновиди залізорудної сировини із вірогідністю 0,91%.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Встановлено, що для ідентифікації геолого-мінералогічних різновидів залізорудної сировини можуть бути використані оцінки змін швидкості поширення поздовжніх та поперечних об'ємних ультразвукових хвиль, співвідношення цих величин у контрольованому середовищі, а також параметр, що характеризує ступінь нелінійності цього процесу – величину загасання ультразвуку на основній і вищих гармоніках.

Пропонований метод на основі результатів ультразвукових вимірювань характеристик гірських порід і нечіткого логічного висновку дозволяє з високим ступенем точності ідентифікувати мінералого-технологічні різновиди руди в гірському масиві в початковій стадії технологічного процесу її видобутку і переробки, порівняти їх відповідного технологічного регламенту, а також технологічних агрегатів і тим самим забезпечує досягнення заданих показників гірничозбагачувального переділу з урахуванням вимог охорони навколишнього середовища та енергоефективності.

Шляхом порівняльного аналізу різних алгоритмів точної та нечіткої кластеризації встановлено, що найкращі результати, з точки зору точності та ефективності, забезпечує метод Fuzzy C-Shape, який замінює норму внутрішнього добутку у моделі FCM функцією відстані на основі форми.

Список літератури

1. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Kalinichenko O., Fedko M. Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials, Mining of Mineral Deposits. 2016. Vol. 10.3. pp 46–51. doi: 10.15407/mining10.03.046.
2. Stupnik M., Kalinichenko O., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Morhun O. Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining, Mining of Mineral Deposits. Vol. 12.4. pp 56–62. doi: 10.15407/mining12.04.056.
3. Pysmennyi S., Shvager N., Shepel O., Kovbyk K., Dolgikh O. Development of resource-saving technology when mining ore bodies by blocks under rock pressure, E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 166. 02006. doi: 10.1051/e3sconf/202016602006.
4. Bowa V. M. Optimization of blasting design parameters on open pit bench a case study of Nchanga open pits, International journal of scientific & technology research. 2015. Vol. 4.9 (2015) 45-51.
5. Pan X. Optimization of mineral processing plant through ROM ore size, AGH Journal of Mining and Geoengineering. 2012. Vol. 36.4. pp 123-132.
6. Yue Z.Q., Lee C.F., Law K.T., Lam L.G. Automatic monitoring of rotary percussive drilling for ground characterization, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2015. Vol. 41. pp 573–612.
7. Schunnesson H. Rock characterisation using percussive drilling, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2014. Vol. 35.6. pp 711–725.
8. Schunnesson H., Holme K. Drill monitoring for geological mine planning in the Viscaria copper mine Sweden, CIM Bulletin. 2015. Vol. 90.1030. pp 82-89.
9. Beattie N. Monitoring-while-drilling for open-pit mining in a hard rock environment: Master's thesis. Kingston. Queen's University. 2012. 127 p.

10. **Martin J.** Application of Pattern Recognition Techniques to Monitoring-While-Drilling on a Rotary Electric Blast Hole Drill at an Open-Pit Coal Mine, Master's thesis, Queen's University, Kingston, 2013.
11. **Scoble M., Peck J., J., Hendricks C.** Correlation between rotary drill performance parameters and borehole geophysical logging, *Mining Science and Technology*. 2012. Vol. 8. pp 301-312.
12. **Segui J. B., Higgins M.** Blast design using measurement while drilling parameters, *Fragblast: International Journal for Blasting and Fragmentation*. 2012. Vol. 6.3–4. pp 287–299.
13. **Morkun V., Morkun N., Tron V.** Identification of control systems for ore-processing industry aggregates based on nonparametric kernel estimators, *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol. 7.1. pp 14-17.
14. **Morkun V., Tron V.** Automation of iron ore raw materials beneficiation with the operational recognition of its varieties in process streams, *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. Vol. 6.6. pp 4 7.
15. **Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A.** The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp, *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. Vol. 6.6. pp 8-11.
16. **Gao L., Zhang W., Lu W., Hu X., Wu H., Wang J., Kong B.** Study on the effects of temperature and immersion on the acoustic emission and electromagnetic radiation signals of coal rock damage under load, *Engineering Geology*. 2022. Vol. 297. 106503. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106503>.
17. **Шульгин П. Н.** Физика горных пород. Акустические свойства горных пород. ДОДСТУ, 2018. 67 с.
18. **Kou X., Pei C., Chen Z.** Fully noncontact inspection of closed surface crack with nonlinear laser ultrasonic testing method, *Ultrasonics*. 2021. Vol. 114. 106426. doi: 10.1016/j.ultras.2021.106426.
19. Акустические свойства горных пород. URL: <http://ctcmetar.ru/volnovye-processy/9297-akusticheskie-svoystva-gornyh-porod.html> (дата звернення: 15.12.2021).
20. Акустический каротаж по скорости. URL: <http://fccland.ru/dobycha-nefti/6826-akusticheskiy-karotazh-po-skorosti.html> (дата звернення: 15.12.2021).

УДК 622.831

О.В. СОЛОДЯНКІН, В.Г. ШАПОВАЛ, доктори техн. наук, професори,
С.М. ГАПЄЄВ, д-р техн. наук, доц., К.В. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
О.А. СОЛОДЯНКІНА, наук. співроб.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В МАСИВІ ПОРІД НАВКОЛО ПРОТЯЖНИХ ВИРОБОК

Мета. Метою досліджень є комплексна оцінка геомеханічних та технологічних факторів, що впливають на інтенсифікацію деформаційних процесів у приконтурному масиві порід в околі протяжних гірничих виробок.

Методи дослідження. Результати, наведені у статті отримані з використанням методів шахтних досліджень, математичної обробки натурних вимірів, аналізу та узагальнення результатів попередніх досліджень, досвіду спорудження та експлуатації підземних гірничих виробок різного призначення.

Наукова новизна. Встановлено, що збільшення площі поперечного перерізу капітальних виробок в умовах шахти імені Героїв космосу в 1,4 рази за останні 40 років викликало зростання зміщень породного контуру на величину $k_s = 1,175$. Отримано значення коефіцієнта інтенсивності деформацій $k_i = 0,66$, що дозволило оцінити сучасний геотехнічний стан породного масиву – зниження його міцності та збільшення напруженого стану порід через техногенну порушеність і сумарний вплив очисних та гірничопідготовчих робіт на ділянку експлуатаційного горизонту. Показано, що показники умов розробки шахти ім. Героїв Космосу на сучасному етапі експлуатації дорівнює $\theta = 0,41$ (визначений без урахування коефіцієнта k_i $\theta = 0,62$), що свідчить про високу ступінь складності умов експлуатації комплексу гірничих виробок.

Практична значимість. Виконана оцінка гірничо-геологічних, геотехнічних та технологічних факторів та отримані коефіцієнти, що характеризують інтенсифікацію деформаційних процесів навколо протяжних виробок. Це дозволяє визначити ступень складності умов експлуатації виробок, обґрунтовано підійти до проектування конструкцій кріплення, засобів з охорони і підтримання виробок та технології ведення гірничопрохідницьких робіт. Практичними результатами має стати суттєве підвищення ефективності технологічних та організаційних рішень для забезпечення надійної і безпечної експлуатації капітальних і підготовчих протяжних виробок, а також зниження обсягів ремонтних робіт протягом тривалого терміну їх експлуатації.

Результати. Встановлені залежності зміщень контуру виробок від часу їх експлуатації для умов шахти імені Героїв Космосу компанії «ДТЕК Павлоградвугілля». Встановлені значення коефіцієнтів, що призводять до інтенсифікації зміщень породного контуру протяжних виробок: від технологічного параметру – площі поперечного перерізу виробки, враховане коефіцієнтом перерізу k_s та комплексу геомеханічних параметрів, що оцінюються коефіцієнтом інтенсивності деформацій k_i .