

УДК 622.831.31:622.834

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.44.992

## ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКІВ І КОНТРОЛЮ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ВИРОБОК В УМОВАХ МІНЛИВОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД

БЕЛІКОВ А. С.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
СЛАЩОВА О. А.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, с. н. с.*,  
КОГТЕВА О. П.<sup>3</sup>, *асп.*,  
ЯЛАНСЬКИЙ О. А.<sup>4</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: [belikov@pdaba.edu.ua](mailto:belikov@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2\*</sup> Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, вул. Сімферопольська 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: [gtmigtm@gmail.com](mailto:gtmigtm@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

<sup>3</sup> Кафедра біотехнології та безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 651-73-94, e-mail: [200483leo@gmail.com](mailto:200483leo@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7282-8243

<sup>4</sup> Кафедра електропривода, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: [yalanskiy.o.a@gmail.com](mailto:yalanskiy.o.a@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Сучасне геотехнічне виробництво або підземна споруда, що використовується як військово-промисловий об'єкт, повинні відповідати вимогам міжнародних стандартів з управління ризиками, які складають основу безпечного та ефективного управління. Впровадження ефективного управління ризиками сприяє підвищенню якості прийняття рішень, а також позитивно діє на благо підприємства та суспільства в цілому. *Мета дослідження* – вдосконалення методу визначення ризиків втрати стійкості гірничих виробок та інших підземних споруд з урахуванням мінливості фізико-механічних властивостей гірських порід. *Методика* – застосування системного підходу в аналітичних дослідженнях літературних джерел, систематизація сучасних підходів і методів у визначенні ризиків у системі безпеки життєдіяльності, обробка статистичними методами, використання теорії ймовірності. *Результати.* За результатами натурних досліджень підземної виробки шахти «Ювілейна» ВСП «ШУ Першотравенське» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» побудовано графіки деформацій покрівлі, визначено зміщення, отримано залежності та виконано ідентифікацію ризиків руйнування підземної виробки. *Наукова новизна.* Вперше запропоновано використання розкиду параметрів за їх стандартним відхиленням при ідентифікації ризику втрати стійкості підземної виробки. *Практична значимість.* Запропоновано методика з ідентифікації та прогнозу геомеханічних параметрів для ризик-орієнтованої системи контролю стійкості породного масиву для забезпечення безпеки під час використання розробок як оборонно-промислових комплексів.

**Ключові слова:** *ризик; підвищення безпеки; втрата стійкості; зміщення; відхилення; небезпека; обвалення; виробка*

## FEATURES OF RISK DETERMINATION AND CONTROL OF THE UNDERGROUND FACILITIES STABILITY LOSS UNDER CONDITIONS OF ROCKS PROPERTIES VARIATION

BIELIKOV A.S.<sup>1</sup>, *Dr.Sc. (Tech.), Prof.*,  
SLASHCHOVA O.A.<sup>2\*</sup>, *Ph. D. (Tech.), Sen. Res.*,  
KOHTEVA O.P.<sup>3</sup>, *Postgrad. Stud.*,  
YALANSKYI O.A.<sup>4</sup>, *Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: [belikov@pdaba.edu.ua](mailto:belikov@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2\*</sup> Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by M. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, 2-a, Simferopolska St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: [gmitgm@gmail.com](mailto:gmitgm@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

<sup>3</sup> Department of Biotechnology and of Life Safety, State Higher Educational Establishment "Ukrainian State University of Chemical Technology", 8, Naharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 651-73-94, e-mail: [200483leo@gmail.com](mailto:200483leo@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7282-8243

<sup>4</sup> Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: [yalanskiy.o.a@gmail.com](mailto:yalanskiy.o.a@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

**Abstract. Problem statement.** Modern geotechnical production or an underground structure used as a military-industrial facility must meet the requirements of international risk management standards, which form the basis of safe and effective management. Implementation of effective risk management improves the quality of decision making, and has a positive impact on the benefit of the enterprises and society as a whole. **The purpose of the article.** To improve the method of risks' determining for the mining stability loss and other underground structures, taking into account the variability of the physical and mechanical properties of rocks. **Methods.** The use of a systematic approach in analytical studies of literary sources, systematization of modern approaches and methods in determining risks in the life safety system, processing by statistical methods, and the use of probability theory. **Research results.** Based on the results of field studies of the underground mining of the Yubileynaya mine at the Pershotravenskoye Mining Structural Division of PuAT DTEK Pavlogradugol, graphs of roof deformations were constructed, displacements were determined, dependencies were obtained, and the risks of underground mining destruction were identified. **Scientific novelty.** For the first time, the use of the parameters' scatter by their standard deviation in identifying the risk of stability loss for underground mining is proposed. **Practical value.** A methodology for identifying and predicting geomechanical parameters for a risk-oriented system for monitoring the stability of the rock mass while ensuring safety when using developments as military-industrial complexes is proposed.

**Keywords:** risks; safety improvement; loss of stability; displacement; deviation; hazard; collapse; mining

**Постановка проблеми.** Сучасні нормативні документи з безпеки вимагають, щоб ризики на всіх виробництвах, особливо на небезпечних, були заздалегідь виявлені та проаналізовані. Процес управління ризиками допомагає приймати правильні рішення з урахуванням різних невизначеностей або можливостей настання будь-яких подій (негативних, навмисних, випадкових) та їх вплив на поставлені цілі [1]. Принцип ефективного управління ризиками включає в себе комплекс управлінських рішень, комунікацію, консультування, аналіз, оцінювання, моніторинг, перегляд ризиків.

Зазначається [2], що «ризик» – це комбінована міра ймовірності настання певної події та наслідків, якщо ця подія відбудеться. В разі, коли виникають події з несприятливими наслідками, джерело потенційної шкоди називається «небезпекою», а тригери, що можуть спричинити реалізацію цих небезпечних подій, називаються «загрозами».

Найбільшу світову популярність здобули стандарти з управління ризиками (Risk management standard, RMS) і керівництва: ISO 31000: 2009 і ISO / IEC

31010: 2009, що застосовуються в Європейському союзі; AS / NZS 4360 і керівництва – в ЄС, Новій Зеландії та Австралії; «Управління ризиками організацій. Інтегрована модель» (Enterprise Risk Management – Integrated Framework, COSO, USA) – у Великобританії, Японії, США, ПАР і Канаді [3–6]. ISO 45001:2018 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування» – це перший єдиний для всіх країн стандарт із системи менеджменту охорони здоров'я та організації безпеки праці на виробництвах [7]. За цим стандартом підприємство, насамперед, відповідає за вибір методів та дій, які дозволяють усунути небезпеку повністю. Якщо це неможливо, розглядається питання про заміну на менш небезпечні процеси, технології, матеріали та інше.

В Україні власники підприємств із підвищеною небезпекою, до яких належать підземні виробки, повинні постійно визначати та враховувати ризики під час господарської діяльності підприємства. Стаття 20 «Кодексу цивільного захисту України» зобов'язує суб'єкти господарювання проводити оцінювання

ризиків виникнення надзвичайних ситуацій та здійснювати заходи щодо неперевикнення прийнятних рівнів таких ризиків. Стаття 8 вимагає забезпечувати експлуатацію об'єктів підвищеної небезпеки з додержанням прийнятного рівня ризику, а цивільний захист здійснювати за основним принципом максимально можливого, економічно обґрунтованого зменшення ризику виникнення надзвичайних ситуацій.

Слід зазначити, що останнім часом велика увага приділяється спорудженню оборонно-промислових комплексів у підземних виробках шахт та інших підземних спорудах. Безпека цих об'єктів безпосередньо пов'язана з ризиком руйнування засобів кріплення та активізацією проявів гірського тиску внаслідок негативного впливу сукупної дії гірничо-геологічних, гірничотехнічних і технологічних факторів [8; 9].

Зокрема, ризики підвищення статичних або динамічних напружень у масиві гірських порід зумовлені реологічними процесами, обводненням порід і ґрунтів, раптовим відшаруванням безпосередньої та осіданням основної покрівлі виробок, вибухів під землею і на її поверхні та іншими.

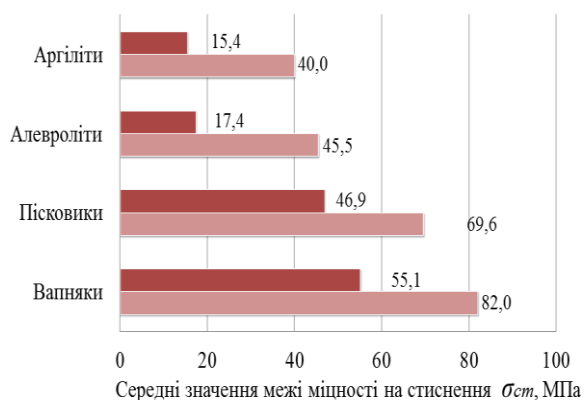
Таким чином, дослідження методів контролю процесів деформування гірничих виробок і заглиблених об'єктів показали, що без розрахунку ризиків і управління ризиками неможливе проведення господарської діяльності в підземних виробках. Разом із тим, для підтримання

прийнятного рівня ризику та забезпечення стійкості підземних споруд на весь час їх експлуатації в умовах мінливості властивостей гірських порід є необхідність вдосконалення існуючих і розроблення нових методів ідентифікації ризиків та прогнозу геомеханічних параметрів.

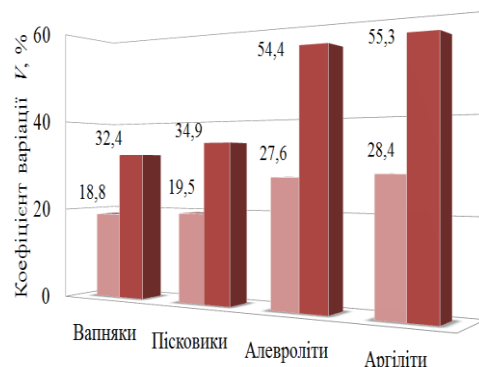
**Мета дослідження** – вдосконалення методу визначення ризиків втрати стійкості гірничих виробок та інших підземних споруд з урахуванням мінливості фізико-механічних властивостей гірських порід.

**Результати досліджень.** Безпечна експлуатація підземних виробок багато в чому залежить від гірничо-геологічних умов їх розташування, які характеризуються невизначеністю фізико-механічних властивостей гірських порід. Це пов'язано з тим, що природні властивості гірських порід, ще до їх руйнування, мають значну мінливість фізико-механічних показників міцності та інших властивостей.

Під час непружних деформацій гірських порід і ґрунтів відбуваються процеси різкого зниження їх міцності, активного деформування контуру виробок, значною мірою зростають навантаження на кріплення. Тому очевидно, що мінливість природних фізико-механічних властивостей гірських порід і активізація змін міцності за впливу гірського тиску та обводнення викликають нерівномірні (більшою чи меншою мірою) деформування контуру будь-яких підземних споруд, а найголовніше – зміни рівнів ризиків втрати стійкості гірничотехнічної системи в цілому.



а



б

■ - варіації міцності у сухому стані; ■ - варіації міцності у водонасиченому стані  
Рис. 1. Мінливість властивостей гірських порід: а – міцності на стиснення; б – коефіцієнтів варіації

Для оцінювання факторів ризиків, що впливають на втрату стійкості виробок та призводять до травмування або загибелі персоналу, слід застосовувати методи, які базуються на статистично значущій кількості параметрів або визначених закономірностях поведінки породного масиву [10; 11].

На рисунку 1, а наведено мінливість середніх значень межі міцності на стиснення порід. Збільшення вмісту глинистої фракції сприяє не тільки зменшенню міцності при обводненні порід, а й збільшенню розкиду параметрів міцності (збільшенню коефіцієнта варіації, рис. 1, б).

Установлено, що коефіцієнти варіації міцності порід залежать від їх насичення водою. При водонасиченні породи мають більший розкид середніх значень коефіцієнтів варіації, ніж у сухому стані. Для аргілітів і алевролітів зміна цього показника становить ~48–58 %, для пісковиків і вапняків ~44–52 %. Тобто при водонасиченні простежується збільшення до 60 % розкиду міцності порід від розкиду міцності порід в сухому стані. Значення коефіцієнтів варіації дозволяють досліджувати ризики виникнення небезпечних станів масиву порід за

критичних параметрів (мінімальних міцностей) у сухому і насиченому водою стані.

Експериментально доволі складно визначити вплив кожного фактора окремо на деформації кріплення виробок. Тому інструментальними вимірюваннями визначались, в основному, величина та інтенсивність домінуючих зміщень, які характеризують сукупний результат силового впливу породного масиву на підземну виробку. Дослідження проведені на основі візуальних спостережень та замірів перетинів виробки, з метою оцінення зовнішніх пошкоджень виробки і визначення їх небезпечності. Інструментальним методом отримано параметри зміщення покрівлі, підшви і боків виробки.

На рисунку 2 показано об'ємний графік деформування виробки за даними натурних досліджень підземної виробки шахти «Ювілейна» ВСП «ШУ Першотравенське» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Встановлено, що активізація деформацій контуру виробки відбувається в зонах підвищеної тріщинуватості і, внаслідок цього, низької міцності порід.

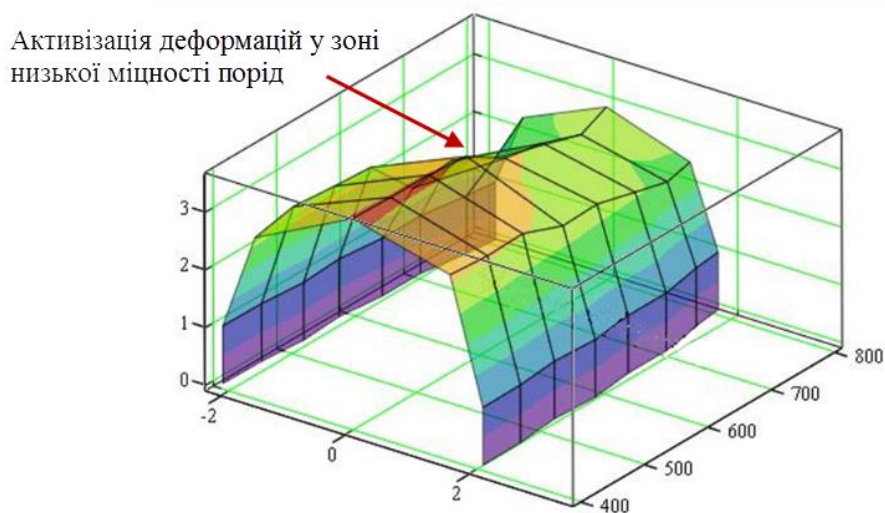


Рис. 2. Нерівномірність деформування гірничої виробки за даними натурних спостережень

На рисунку 3 показано деформування виробки поза зоною дії динамічного тиску з виділенням розкиду параметрів, а також

визначено залежність, за якою відбувається деформування кріплень цієї виробки. Залежність має вигляд:

$$u = 0,0019 t - 0,005; R^2 = 0,76. \quad (1)$$

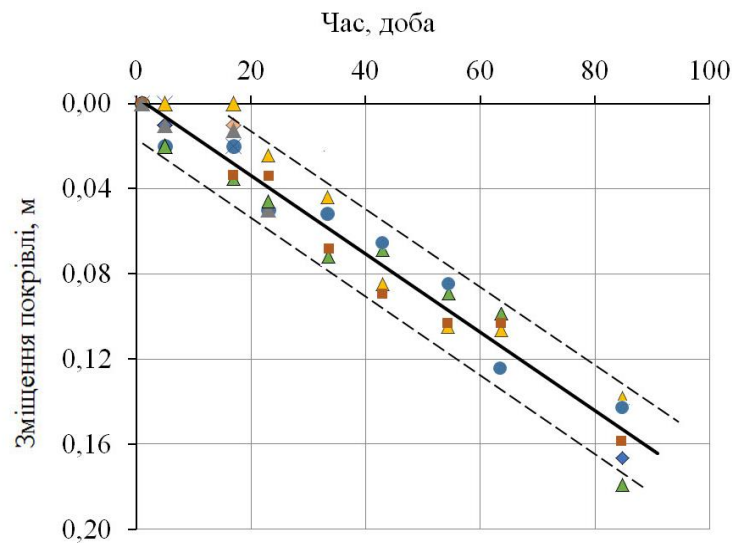


Рис. 3. Деформування покрівлі підземної виробки за даними натурних досліджень у часі з виділенням розкиду параметрів за їх стандартним відхиленням

На графіку показано лінії максимальних і мінімальних відхилень, що утворюють певну зону розкиду параметрів. Цей розкид пов'язаний із зміною фізико-механічних властивостей порід як за довжиною виробки, так і з урахуванням обводненості порід, що також викликає коливання параметрів.

Втрата стійкості підземних виробок відбувається у разі перевищення зміщень породного контуру, величина яких безпосередньо залежить від геомеханічного стану породного масиву, інтенсивності процесу деформування, проектних технологічних зазорів, що визначаються габаритами рухомого складу, безпечним проходом людей та іншого. Здебільшого, піддатливе кріплення підземних виробок має конструктивну піддатливість 300 мм, а проектний зазор становить 600 мм, тому зміщення контуру більше 300–600 мм спричинюють вигин елементів кріплення та його руйнування, а більше 900 мм — порушення технологічних зазорів і втрату стійкості виробки.

Тому для оцінення стійкості підземних виробок значення зміщень потрібно диференціювати на три характерні режими, що визначаються значеннями зміщень: 0–300 мм (кріплення працюють у паспортному режимі), 300–600 мм (порушення замкових з'єднань і вигин

верхняків), 600–900 мм і понад 900 мм (порушення технологічних зазорів, втрата стійкості виробок).

Дослідженнями встановлено, що для порід значний розкид даних є наслідком їх великої неоднорідності, і в меншому ступені — похибок різних методів та апаратури досліджень. Розкид параметрів пояснюється тим, що серед слабких пісковиків, аргілітів та алевролітів зазвичай присутні шари міцних порід тих же літологічних різниць.

Результати однозначно показують, що для визначення стійкості підземних споруд та оцінення ризиків їх руйнування необхідно використовувати стандартні відхилення та коефіцієнти варіації параметрів фізико-механічних властивостей порід та зміщень контуру виробок. Коефіцієнти варіації, наприклад міцності, визначають за співвідношенням:

$$V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{сж_i} - \overline{\sigma_{сж_i}})^2}}{\sigma_{сж_i}}. \quad (2)$$

Стандартні відхилення і коефіцієнти варіації дозволяють урахувати заздалегідь гірші умови за мінімальним або максимальним значенням параметрів. У даному випадку діапазон випадкового розкиду даних ще ширший і отримання

адекватних результатів неможливе без обов'язкового урахування цих розкидів. Крім того, методика оцінювання безпеки підземних об'єктів повинна передбачати розрахунок за критичних умов, особливо з урахуванням можливості таких потужних динамічних впливів як вибухи. Оцінка безпеки об'єкта повинна включати найгірший (за динамічного впливу) і

найбільш вірогідний сценарій розвитку деформації кріплення виробки.

На рисунку 4 показано приклад ідентифікації ймовірних небезпечних ситуацій на основі натурних досліджень за зміщеннями, які пов'язані зі станом породного масиву і можливою небезпекою у зв'язку з цим.

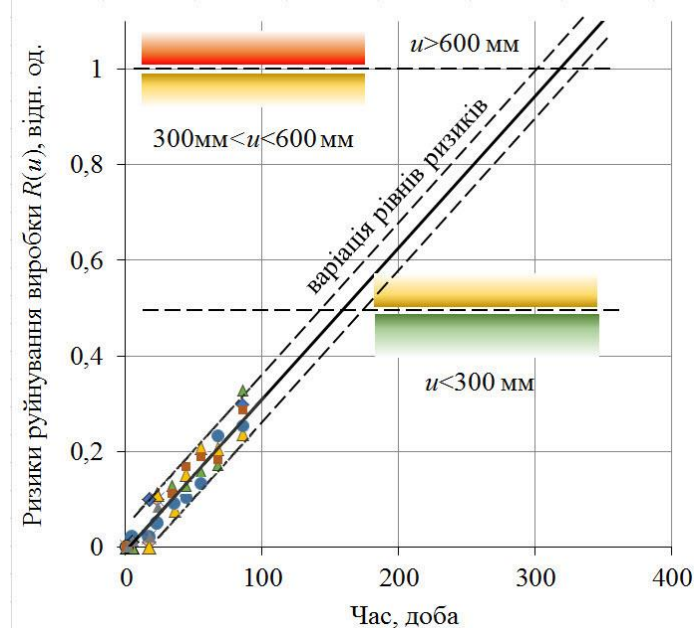


Рис. 4. Ідентифікація ризиків руйнування підземної виробки на основі результатів спостережень. Рівні ризику позначені кольорами: зелений – «безпечна зона» ( $u < 300$  мм), жовтий – «зона уваги» ( $300 \text{ мм} < u < 600$  мм), червоний – «небезпечна зона» ( $600 \text{ мм} < u < 900 \dots 1200$  мм). Зміщення більше 1 200 мм спричиняють повну втрату функціональності виробки

За результатами статистичного аналізу даних вимірювань зміщень покрівлі підземної виробки встановлено регресійну залежність ризиків втрати стійкості  $R(u)$  у часі  $t$  і перевищення кріпленням паспортної піддатливості:

$$R(u) = 0,0228 t + 0,065; R^2 = 0,95. \quad (3)$$

За графіком можна визначити, що після 160-ї доби зміщення починають сягати значень 300...600 мм і виробка потребує уваги і моніторингу. Ризик втрати стійкості для кріплення за даних умов настає в період після 320-ї доби, за результатами прогнозу, який виконано за показниками інструментальних вимірів і побудови трендів та сценарію розвитку процесу деформування. В цей час виробка потребує превентивних заходів із посилення кріплення.

Ризик  $R(E^t)$  виникнення небезпечної ситуації від впливу різних факторів розраховується за співвідношеннями [12–14]. Наприклад, ризик від впливу фактора  $E^t$  в момент часу  $t$  (ймовірність реалізації несприятливого розвитку подій) визначається для кожного з елементів геотехнічної системи, де повний ризик являє собою суму індивідуальних ризиків. Для кожного з елементів геотехнічної системи ризик виникнення аварійної ситуації визначають:

– за значеннями інформативних параметрів в момент часу  $t$ :

$$R(E^t) = k_1^t R(E_1^t) + k_2^t R(E_2^t) + \dots + k_m^t R(E_m^t); \quad (4)$$

– за відхиленнями параметрів від точки рівноваги за проміжок часу  $\Delta t$ :

$$R(E^{\Delta t}) = k_1^{\Delta t} R(E_1^{\Delta t}) + k_2^{\Delta t} R(E_2^{\Delta t}) + \dots + k_n^{\Delta t} R(E_n^{\Delta t}); \quad (5)$$

– за швидкістю відхилення параметрів за проміжок часу  $\Delta t$ :

$$R(E^{v(\Delta t)}) = k_1^{v(\Delta t)} R(E_1^{v(\Delta t)}) + \dots + k_k^{v(\Delta t)} R(E_k^{v(\Delta t)}), \quad (6)$$

де  $R(E^t)$ ,  $R(E^{\Delta t})$ ,  $R(E^{v(\Delta t)})$  – ризики виникнення аварійної ситуації в одному з елементів геотехнічної системи, в. о.;  $R(E_m^t)$ ,  $R(E_n^{\Delta t})$ ,  $R(E_k^{v(\Delta t)})$  – ризики, визначені за значенням інформативних параметрів в момент часу  $t$ ; відхилень і швидкостей відхилень параметрів геотехнічної системи від точки рівноваги для груп з  $m$ ,  $n$  і  $k$  факторів, що впливають, відповідно, в. о.;

$k_1^t, k_2^t, \dots, k_m^t; k_1^{\Delta t}, k_2^{\Delta t}, \dots, k_n^{\Delta t}; k_1^{v(\Delta t)}, k_2^{v(\Delta t)}, \dots, k_k^{v(\Delta t)}$  – нормалізовані коефіцієнти впливу на потенційний ризик окремих факторів [12; 13].

На основі міжнародного досвіду з оцінювання ризиків у підземних виробках наведено приклад попереднього визначення факторів і індикаторів ризику (табл. 1). Рівні ризику визначаються на основі моніторингу проявів небезпечних факторів у виробках, досвіду експертів і часу експлуатації. Далі впроваджуються відповідні дії щодо забезпечення безпеки робочого середовища.

Таблиця 1

**Фактори та індикатори ризиків щодо попередньої оцінки стійкості підземної виробки**

Рівень	I рівень нормальний стан	II рівень потребує уваги	III рівень	IV рівень	
Індикатор	«безпечно»	«умовно безпечно»	«увага»	«небезпечно»	
Індикатори ризику, візуальна оцінка стану об'єкта	<u>Покрівля</u>	- пласт порід >1 м; - конвергенція менше ніж 50 мм за годину; - осипання вибою менше 0,5 м	- погіршення стану покрівлі, тріщинуватість; - пласт порід < 1 м; - конвергенція > 50 мм за годину, але менше 100 мм за годину; - незначні потоки рідини	- великі блоки пісковику в межах 5 м від виробки; - конвергенція більше 100 мм за годину, але менше 200 мм за годину	- зсув покрівлі >1 м; конвергенція >200 мм за годину; - безперервний потік рідини
	<u>Підощва</u>	відшарування порід < 0,5 м	відколи порід 0,5...1,0 м	великі відколи порід 1,1...1,5 м	сильна крихкість порід, великі відколи більше 1,5 м

Моніторинг становить невід'ємну складовою уникнення небажаних подій і управління наслідками, що відповідає Міжнародному стандарту з управління ризиками ISO 31000:2018. Для масового оперативного визначення активізації росту систем тріщин, як наслідків зміни властивостей гірських порід за впливу сил гірського тиску, найбільш прийнятний віброакустичний метод контролю, який використовує активне збудження коливань та резонансні відгуки тріщин у породному масиві. Збудження коливань ударними методами застосовується найчастіше, що пояснюється простотою реалізації і малим енергоспоживанням апаратури. Тріщинувата порода зазвичай характеризується

збільшенням амплітуди коливань з частотами нижче 400 Гц, а частоти вимушених коливань зумовлені резонансними явищами, які можна порівняти з довжиною акустичних напівхвиль.

На рисунку 5 показано віброакустичне профілювання підощви підземної виробки, виконане приладом ІСП-1Ш (індикатор стану покрівлі) з інтервалом ударного впливу через кожні шість метрів. Межі зон підвищеної тріщинуватості визначені за резонансними частотами [15], які й визначалися приладом. Встановлено, що глибини меж підвищеної тріщинуватості розташовані на відстанях 1,0...1,4 м, рідше – 1,8...2,6 м від контуру виробки.

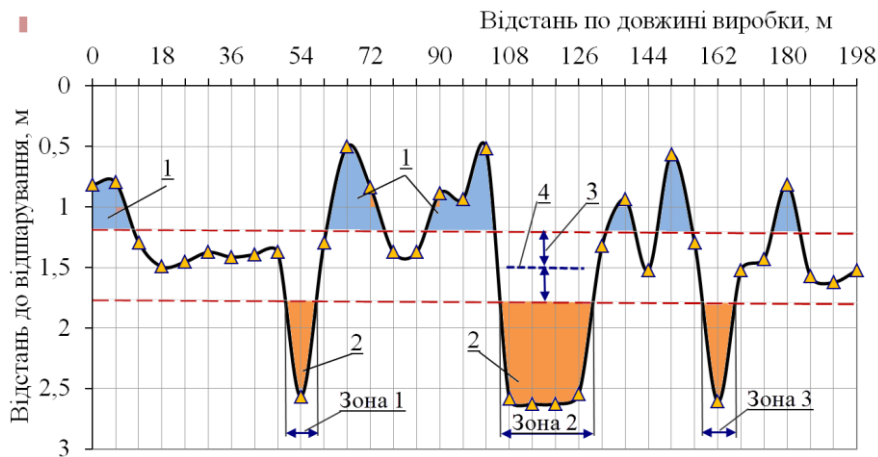


Рис. 5. Результати віброакустичного профілювання за довжиною штреку

Мінливість гірничо-геологічних умов та процесів деформування за довжиною виробки спричинює утворення небезпечних зон, у яких ризики втрати стійкості споруди значно зростають. Запропоновано метод ідентифікації таких аномальних зон, який полягає у визначенні середньої по виробці глибини розташування межі зони тріщин (рис. 5, поз. 4) з урахуванням стандартних відхилень та виявленням «умовно безпечного» діапазону дислокації систем тріщин (рис. 5, поз. 3), де деформування порід відбувається повільно і прогнозовано. Потім визначаються аномальні зони в породному масиві навколо виробки (системи тріщин, що становлять ризики активізації деформацій, рис. 5, поз. 1, 2). На ділянках виробки 0...10 м, 61...69 м, 86...104 м, 133...141 м, 146...157 м і 176...183 м (рис. 5, поз. 1) зростають ризики розпушення та спучування порід приконтурної зони, що підтверджується натурними спостереженнями. Також виявлено ділянки виробки 49...58 м, 105...129 м і 158...166 м, які відрізняються найбільшою товщею порід, що відшарувалися з підняттям підшви виробки і викривленням транспортних шляхів (рис. 5, поз. 2). На ділянках виробки в зонах 1...3 спостерігалось зростання амплітуди акустичних коливань  $\Delta A/A_{mid} = 3,6$  ( $\Delta A$  — збільшення амплітуди на ділянці,  $A_{mid}$  — середня амплітуда поза аномалією), що майже вдвічі вище, ніж у середньому по виробці  $\Delta A/A_{mid}=1,9$ .

Три зони виробки, виділені на рисунку 5, характеризуються різною інтенсивністю тріщинуватості, одна з яких (зона 2) відрізнялася значними деформаціями і великим припливом води, які візуально спостерігалися у виробці. У двох інших зонах (зони 1, 3) прояви гірського тиску були менш інтенсивними, спостерігалось збільшення деформацій по всьому контуру виробки. Подальші дослідження цих зон шляхом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) підтвердили дані віброакустичного контролю, що свідчить про надійність запропонованого методу виявлення та контролю зон підвищеного ризику у підземних виробках.

Процес контролю втрати стійкості підземних виробок в умовах мінливості властивостей гірських порід може бути автоматизованим. Для цього програмно-технічними засобами реалізують закон управління. Для розбиття сигналу на ділянки та виділення уявних складових, за аналогією з наведеними вище результатами, запропоновано порівнювати поточне миттєве значення сигналу контролю з граничними значеннями зони нечутливості (тобто рівень сигналу автоматизованої системи, який не несе інформативного навантаження). В такому випадку нижня межа нечутливості  $A_0 - \Delta TG$ , а верхня межа —  $A_0 + \Delta TG$  ( $2TG$  — ширина зони нечутливості, рис. 6). В даному випадку  $A_0$  — середнє значення, постійна складова оцифрованого сигналу, яка, як правило,



дорівнює величині зсуву аналого-цифрового перетворювача.

Для автоматизації контролю потенційно небезпечних зон в виробках, наприклад, які показані на рисунку 5, поз. 1, 2, застосовуються апаратний або програмний компаратор ТН1, що встановлюється в одиничний стан у разі поточного вхідного сигналу більшого за верхню межу  $A_t > A_0 + \Delta TG$  ( $A_t$  – амплітуда сигналу на момент часу  $t$ , рис. 6), і компаратор ТН2, який встановлюється в одиничний стан у разі значення цифрового коду менше нижньої межі  $A_t < A_0 + \Delta TG$ .

При цьому значення  $A_0$  та зона нечутливості співвідносяться до рівня верхньої межі «умовно безпечного»

діапазону дислокації даних систем тріщин, якщо потрібно контролювати ближню до виробки зону масиву порід (див. рис. 5, поз. 1). Якщо контролюється зона масиву порід на більшій глибині (1,7...2,6 м, див. рис. 5, поз. 2) значення  $A_0$  та зона нечутливості співвідносяться до рівня нижньої межі «умовно безпечного» діапазону. Якщо виходи компараторів підключаються відповідно до входів установки (S) та скидання (R) апаратного або програмного RS-тригера, тоді початок кожного нового  $i$ -го інтервалу контролю визначиться фронтом вихідного сигналу RS-тригера. Вихідний сигнал RS-тригера спрацьовує лише на визначений в автоматизованій системі рівень загроз.

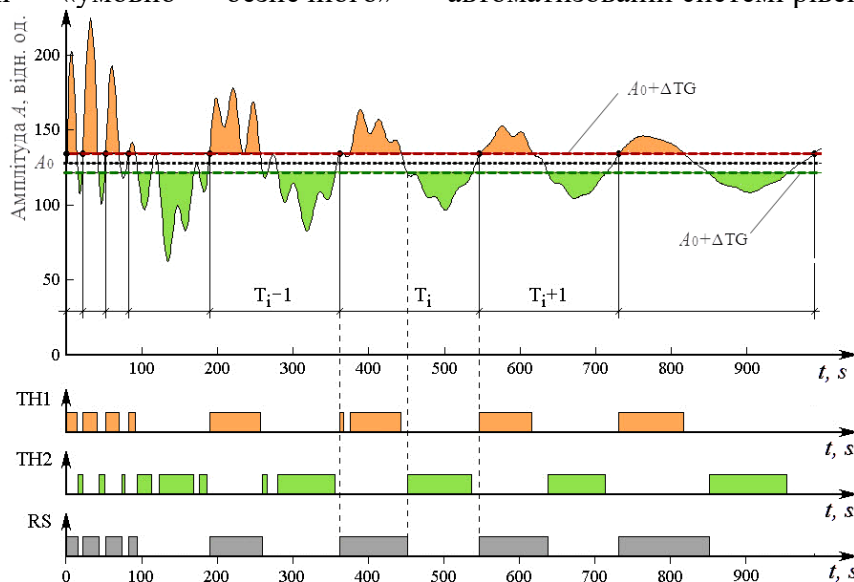


Рис. 6. Розбиття аперіодичного сигналу на часові інтервали на основі алгоритму роботи двох елементів порівняння ТН1, ТН2 та RS-тригера

Результати досліджень щодо прогнозу наслідків впливу мінливості гірничо-геологічних факторів на ризики втрати стійкості підземних об'єктів використано для розроблення і впровадження «Методичних рекомендацій з визначення ризиків і оцінки небезпеки втрати стійкості підземних виробок, що призначені для розміщення промислових та оборонних споруд». Рекомендації містять систематизацію некерованих факторів та наслідків, що впливають на ризики втрати стійкості підземних виробок для промислових та оборонних об'єктів, технологію управління ризиками,

визначення ризиків і оцінку небезпеки втрати стійкості підземного об'єкта на основі інструментального моніторингу зміщень покрівлі. Встановлюються додаткові способи, які дозволяють підвищити якість управлінських рішень з безпеки за рахунок експертної оцінки стану захисних споруд та підземних виробок. Прогноз стану підземних об'єктів сприяє зниженню ризиків руйнування кріплення і запобіганню значних фінансових витрат на ліквідацію можливих аварій.

Таким чином, удосконалено інформаційні апаратні технології та запропоновано алгоритми цифрового

перетворення сигналів автоматизованої системи з тимчасової області на частотну, що забезпечують підвищення надійності та зменшення розмірів геотехнічної інформації, яка передається. Методи та алгоритми можуть бути використані для вдосконалення існуючих та розроблення нових систем безпеки гірничих робіт.

### Висновки

1. Подальший розвиток отримав метод ідентифікації ризиків руйнування підземної виробки за результатами натурних досліджень, який відрізняється урахуванням варіації значень і стандартних відхилень прогнозованих ризиків втрати функціональності гірничої виробки та критеріїв порушення її технологічних зазорів у певний момент часу, що визначаються за верхніми і нижніми межами значень зсувів порід покрівлі, зумовлених мінливістю некерованих фізико-механічних властивостей гірських порід та гірничотехнічних факторів в умовах конкретної виробки. Це дозволяє оцінювати рівень небезпеки втрати стійкості гірничої виробки за мінімальними і максимальними показниками ризиків, більш обґрунтовано вживати заходів із реагування.

2. Запропоновано метод ідентифікації потенційно небезпечних зон за довжиною виробки, в яких ризики втрати стійкості споруди значно зростають, котрий полягає у

визначенні середньої по виробці глибини розташування межі зони тріщин віброакустичним методом з урахуванням стандартних відхилень та виявленням «умовно безпечного» діапазону дислокації систем тріщин, де деформування порід відбувається повільно і прогнозовано, а також «небезпечних» зон, в яких ризики активізації деформацій зростають.

Для автоматизації контролю потенційно небезпечних зон у виробках удосконалено інформаційні апаратні технології та запропоновано алгоритми цифрового перетворення сигналів автоматизованої системи з часової області на частотну з порівнюванням поточних миттєвих значень сигналу контролю з граничними значеннями зони нечутливості.

3. Розроблено і впроваджено в процеси аналізу ризиків та безпеки захисних споруд «Методичні рекомендації з визначення ризиків і оцінки небезпеки втрати стійкості підземних виробок, що призначені для розміщення промислових та оборонних споруд», які дозволяють підвищити якість управлінських рішень з безпеки шляхом експертної оцінки стану захисних споруд та підземних виробок, а також якість підготовки у вищих навчальних закладах фахівців в області оцінювання стану підземних споруд та промислової безпеки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). 2018.
2. Galvin J.M. Ground Engineering – Principles and Practices for Underground Coal Mining. Manly, NSW, Australia. 2016.
3. International Standards Office ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines, provides principles (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2018.
4. International Standards Office ISO/IEC 31010:2009. Risk management – Risk assessment techniques (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2009.
5. The Institute of Risk Management (IRM), The Association of Insurance and Risk Managers (AIRMIC) and ALARM. The National Forum for Risk Management in the Public Sector. Risk management standard (FERMA RMS: Electronic documents, BSI, London, UK. Adopted by Federation of European Risk Management Associations). 2002.
6. Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission 2004. COSO II ERM Enterprise Risk Management – Integrated Framework (COSO, USA). 2004.
7. International Organization for Standardization. ISO 45001:2018(en). Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use, URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:en> (Accessed 4 Aug 2023). 2018.
8. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 00094.
9. Slashchova O. Water effect on the rocks and mine roadways stability. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 00092.

10. Shevchenko V., Slashchov A. Justification of the basic algorithms of the mine safety information system. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 86.
11. Slashchova O., Slashchov I., Sapunova I. Specific solution of problem of water filtering in the rocks by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. Pp. 00093.
12. Слащов І. М., Слащова О. А., Осінній В. Я., Сапунова І. О., Константинова І. Б. Ідентифікація факторів ризиків втрати стійкості гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 209–222.
13. Слащов А. І. та ін. Ієрархічна модель формалізації нечіткого логічного виводу для цифрових систем оцінки стійкості гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 122–131.
14. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources : 3<sup>nd</sup> International Sci. and Tech. Conf. Book of Abstracts. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.
15. Булат А. Ф., Усаченко Б. М., Яланський А. А. та ін. Методичний посібник з комплексної геофізичної діагностики породного масиву та підземних геотехнічних систем. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2004. 75 с.

## REFERENCES

1. DSTU ISO 31000:2018. *Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy (ISO 31000:2018, IDT)* [DSTU ISO 31000:2018. Risk management. Principles and guidelines (ISO 31000:2018, IDT)]. 2018. (in Ukrainian).
2. Galvin J.M. Ground Engineering – Principles and Practices for Underground Coal Mining. Manly, NSW, Australia. 2016. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2>
3. International Standards Office ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines, provides principles (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2018.
4. International Standards Office ISO/IEC 31010:2009. Risk management – Risk assessment techniques (Electronic documents, ISO, Geneva, Switzerland). 2009.
5. The Institute of Risk Management (IRM). The Association of Insurance and Risk Managers (AIRMIC) and ALARM. The National Forum for Risk Management in the Public Sector. Risk management standard (FERMA RMS: Electronic documents, BSI, London, UK. Adopted by Federation of European Risk Management Associations). 2002.
6. Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission 2004. COSO II ERM Enterprise Risk Management – Integrated Framework (COSO, USA). 2004.
7. International Organization for Standardization ISO 45001:2018(en). Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. 2018. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:en> (Accessed: 4 Aug 2023).
8. Slashchov I. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 00094. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900094>
9. Slashchova O. Water effect on the rocks and mine roadways stability. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 00092. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900092>
10. Shevchenko V. and Slashchov A. Justification of the basic algorithms of the mine safety information system. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 86. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900086>
11. Slashchova O., Slashchov I. and Sapunova I. Specific solution of problem of water filtering in the rocks by the finite element method. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, pp. 00093. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900093>
12. Slashchov I.M., Slashchova O.A., Osinniy V.Ya., Sapunova I.O. and Konstantynova I.B. *Identyfikatsiya faktoriv ryzykiv vtraty stiykosti hirnychykh vyrobok* [Identification of risk factors for the loss of stability of mining products]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2019, no. 149, pp. 209–222. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.209> (in Ukrainian).
13. Slashchov A.I., Slashchov I.M., Osinnya N.V. and Konstantynova I.B. *Iyerarkhichna model' formalizatsiyi nechitkoho lohichnoho vyvodu dlya tsyfrovyykh system otsinky stiykosti hirnychykh vyrobok* [The hierarchical model of fuzzy logic output formalization for digital systems evaluating mine workings stability]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2019, no. 149, pp. 122–131. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.122> (in Ukrainian).
14. Slashchova O.A., Yalanskyi O.A. and Slashchov A.I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. Innovative Development of Resource-saving Technologies and Sustainable Use of Natural Ources : 3<sup>nd</sup> International Sc. and Tech. Conf. Book of Abstracts. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020, pp. 126–127. URL: <https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/1>
15. Bulat A.F., Usachenko B.M., Yalanskyi A.A. and oth. *Metodychnyy posibnyk z kompleksnoyi heofizychnoyi diahnostryky porodnoho masyvu ta pidzemnykh heotekhnichnykh system* [Methodical manual for complex geophysical diagnostics of the rock massif and underground geotechnical systems]. Dnipro : IGTM NASU, 2004, 75 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 05.09.2023.