

**ГЕОМЕХАНІЧНІ РИЗИКИ ПРИ ПІДЗЕМНОМУ ВИДОБУТКУ ГІПСУ****<sup>1</sup>Скіпочка С.І., <sup>1</sup>Сергієнко В.М., <sup>1</sup>Амелін В.А., <sup>2</sup>Ситніченко О.Ю.**<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, <sup>2</sup>Товариство з додатковою відповідальністю «Siniat» міжнародного концерну "Etex Group"**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ ГИПСА****<sup>1</sup>Скипочка С.И., <sup>1</sup>Сергиенко В.М., <sup>1</sup>Амелин В.А., <sup>2</sup>Сытниченко О.Ю.**<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, <sup>2</sup>Общество с дополнительной ответственностью «Siniat» международного концерна "Etex Group"**GEOMECHANICAL RISKS AT UNDERGROUND GYPSUM MINING****<sup>1</sup>Skipochka S.I., <sup>1</sup>Serhiienko V.M., <sup>1</sup>Amelin V.A., <sup>2</sup>Sytlichenko O.Y.**<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine, <sup>2</sup>Additional Liability Company «Siniat» of International Concern "Etex Group"

**Анотація.** Стаття присвячена оцінці геомеханічних ризиків при експлуатації гіпсових шахт. Підземний видобуток гіпсу здійснюють переважно з використанням камерно-стовпчастої системи. Вона передбачає довготривалу експлуатацію гірничих виробок великого об'єму. Збереження виробок в робочому стані на протязі десятків років пов'язане з наявністю геомеханічних ризиків. Вони потенційно знижують стійкість гірничих виробок. Це негативно впливає на безпеку праці підземного персоналу. Віддалені наслідки пов'язані з погіршенням екологічного стану навколишнього середовища. В публікації виділено основні геомеханічні процеси, що спричиняють ризики в процесі експлуатації виробок гіпсової шахти. Особливістю гіпсової шахти є наявність кріплення лише на окремих ділянках. В цих умовах найбільш небезпечними є формування блокової структури масиву гірських порід та розшарування покрівлі. Неконтрольований розвиток даних процесів може стати причиною аварійної ситуації. Еволюція карстоутворення над гірничою виробкою може викликати провал на земній поверхні. Значну загрозу становлять також водопріпливи з великим дебітом. Відомі випадки затоплення окремих ділянок шахтного поля і цілих шахт. Представлено орієнтовну градацію негативних наслідків в результаті впливу кожного геомеханічного процесу. Показано, що вагомим фактором виникнення геомеханічних ризиків є варіація фізико-механічних властивостей породного масиву. В цьому випадку для кількісної оцінки геомеханічного ризику може бути використано імітаційне моделювання. Продемонстровано його застосування для оцінки ризику обвалення покрівлі при відомих значеннях варіації розрахункових параметрів. Результатом моделювання є крива імовірності розподілу коефіцієнта запасу міцності покрівлі. Обраховано імовірність недопустимих значень параметра. Враховано можливі наслідки при поетапному зниженні коефіцієнта запасу міцності. Отримано кількісну оцінку величини геомеханічного ризику для конкретного проекту.

Наведена методика має універсальний характер. Вона може бути застосована для оцінки експлуатаційної надійності інженерних об'єктів при значному впливі нестабільних факторів природного походження.

**Ключові слова:** геомеханічний процес, геомеханічний ризик, гіпсова шахта, коефіцієнт запасу міцності, імітаційне моделювання.

**Вступ.** Природні будівельні матеріали традиційно прийнято вважати малоцінними корисними копалинами. Це обумовило орієнтацію на відкритий видобуток даної категорії мінеральної сировини. Однак розробка родовищ відкритим способом в сучасних умовах теж має певні недоліки. В процесі інтенсивної експлуатації надр легкодоступні запаси мінеральної сировини вже видобуті. Для розробки наявних родовищ відкритим способом в багатьох випадках необхідно виконати значний об'єм розкривних робіт. Окрім цього, у всьому світі все більшу увагу звертають на негативні екологічні наслідки відкритої розробки [1-3]. На період експлуатації родовища з господарського обігу виключається велика площа земельних угідь, що зайняті власне кар'єром

та породними відвалами. Порушується гідрогеологічний режим на значній території. До цього слід додати невідворотний негативний вплив на природну екосистему. По завершенню експлуатації родовища в цілому чи окремих його частин необхідні значні витрати на рекультивацію земель. Комплекс вказаних факторів визначає необхідність ретельного економічного прорахунку стосовно доцільності вибору варіанту розробки: підземної чи відкритої. Окрім того, слід враховувати, що при загальній оцінці нерудної будівельної сировини, як дешевої, для окремих її видів існує певна цінова градація. Більш високу вартість, в порівнянні з іншими видами сировини, має гіпс. За умов наявності пластів великої потужності і глибини залягання в діапазоні від 50 до 400 м його доцільно добувати підземним способом. Враховуючи значні розміри відпрацьованих порожнин, системи з їх погашенням використовувати нерационально, оскільки зміна наземного рельєфу за негативними наслідками буде близька до відкритої розробки. В більшості випадків при підземній розробці гіпсу використовують камерно-стовпчасту систему [4].

При розробці корисних копалин переважно приймають до уваги наступні ризики: геологічні, гірничо-технологічні, економічні та екологічні [5]. При застосуванні камерно-стовпчастої системи необхідно підтримувати стійкість її елементів на протязі багатьох десятків років. Тому в даному випадку доцільно розглядати, як додаткову, окрему категорію ризиків – геомеханічні [6, 7]. Під геомеханічними ризиками слід розуміти можливість настання незворотних неприпустимих деформацій елементів камерно-стовпчастої системи. Вони обумовлені як геологічними особливостями конкретного родовища, так і технологією видобутку гіпсу. З врахуванням надзвичайно широкого кола об'єктів, стосовно яких може бути застосований ризик-орієнтований підхід, відсутня універсальна методика визначення міри ризику, в тому числі і геомеханічного. Міжнародний стандарт ISO 45001:2018(E) «Occupational health and safety management systems. Requirement with guidance for use» визначає лише загальну методологію визначення ризиків в тій чи іншій сфері людської діяльності. Більш конкретним є діючий національний стандарт ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 [8]. Але і він орієнтований переважно на якісну оцінку ризику, а стосовно кількісної оцінки обмежується лише оглядом ряду відповідних експертних методів.

**Методика.** За визначенням, величина ризику  $R$  оцінюється виразом

$$R = PU, \quad (1)$$

де  $P$  – імовірність події в діапазоні від 0 до 1;  $U$  – рівень можливих негативних наслідків від найвищого з рівнем 1 до відсутності наслідків з рівнем 0.

Відповідно з (1) величина ризику теж знаходиться в діапазоні від 0 до 1. З посиланням на роботу [8] можна виділити наступні рівні ризику:

- незначний ризик  $R \leq 1 \cdot 10^{-6}$ ;
- припустимий ризик  $1 \cdot 10^{-6} \leq R \leq 5 \cdot 10^{-5}$ ;

- високий ризик  $5 \cdot 10^{-5} \leq R \leq 5 \cdot 10^{-4}$ ;
- неприпустимий ризик  $R \geq 5 \cdot 10^{-4}$ .

В основу наших оцінок геомеханічного ризику покладено методичний підхід, наведений в роботі [9]. При цьому слід зауважити, що негативними наслідками є не лише прямі збитки від повного чи часткового руйнування елементу системи, а і втрати внаслідок обмеження можливостей експлуатації виробки при потенційній загрозі обвалення, збільшення витрат на моніторинг стану виробки та на зведення кріплення чи виконання інших інженерних заходів попереджувального характеру. Можливі наслідки негативних геомеханічних процесів і явищ при довготривалій експлуатації гіпсового родовища з камерно-стовпчастою системою розробки та їх умовний рівень приведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Градація наслідків від впливу негативних геомеханічних процесів в умовах гіпсової шахти

Геомеханічний процес	Градація наслідків при умовному рівні $U$ :				
	неістотні $U = 0,0005$	незначні $U = 0,001$	середні $U = 0,01$	значні $U = 0,1$	катастрофічні $U = 1$
Формування блокової структури масиву	Поява нових тріщин з розкриттям до 1 мм	Розкриття від 1 до 3 мм	Оконтурювання тріщинами породних блоків	Локальні обвалення в межах камери	Обвалення значної ділянки шахтного поля
Розшарування покрівлі виробки	До 1 мм без подальшого зростання	Зростання зі швидкістю до 0,2 мм на рік	Збільшення швидкості осідання відшарування, загроза обвалення	Обвалення відшарування в межах камери	Обвалення відшарування в межах кількох суміжних камер
Карстоутворення	Положення вище основної покрівлі	Локально в основній покрівлі	В основній покрівлі без порушення безпосередньої покрівлі	Вихід карсту в камеру з надходженням пластичної геомаси	Прорив геомаси в шахту, утворення воронки на земній поверхні
Водопритлив з водоносних горизонтів чи розміщених поряд водоймищ	Локальна безнапірна фільтрація по тріщинах	Локальна фільтрація, що вимагає постійного відкачування води	Часткове підтоплення однієї чи декількох суміжних камер	Часткове підтоплення окремих ділянок шахтного поля	Повне затоплення шахти

**Результати та обговорення.** Рис. 1 та 2 ілюструють приклади наслідків геомеханічних процесів, що створюють ризики при багаторічній експлуатації гіпсової шахти.

Істотним геомеханічним чинником, що впливає на довготривалу стійкість елементів системи розробки шляхом формування блокової структури чи

розшарування покрівлі виробки, є варіація показників фізико-механічних властивостей породного масиву. В сукупності з технологічними параметрами, які входять в розрахункову схему і теж можуть змінювати своє значення в певних межах, це призводить до ризику в проектному рішенні. При виборі усереднених значень існує, можливо невеликий, але реальний ризик одночасного збігу відхилень розрахункових параметрів в бік зменшення запасу міцності елемента системи. В умовах гіпсової шахти це проявляється як обвалення покрівлі чи часткове руйнування цілика іноді через десятки років після початку експлуатації виробки.



Рисунок 1 – Ризик обвалення породного блоку в покрівлі камери



Рисунок 2 – Прорив пластичної геомаси в камеру при оголенні карсту в покрівлі виробки

В особливо несприятливих випадках руйнування одного з елементів викликає підвищення навантаження на сусідні, що мають теж невеликий запас міцності. Процес руйнування може не затухнути, а прийняти ланцюговий характер і спричинити катастрофічні наслідки. Прикладом може бути руйнування ціликів і обвалення покрівлі на великій площі, що сталося на гіпсовій шахті Микитівського родовища. Певна категорія проектувальників, щоб уникнути відповідальності в майбутньому, свідомо орієнтується на самий несприятливий випадок, суттєво зменшуючи при цьому коефіцієнт видобутку. Цілком можливий і протилежний варіант, коли для збільшення коефіцієнта видобутку гіпсу ігнорують можливість несприятливої комбінації розрахункових параметрів.

Очевидно, існує необхідність аналітичної оцінки міри ризику, що враховувала б варіацію розрахункових параметрів. Ефективним інструментом для вирішення даної задачі є імітаційне моделювання [10]. Для практичної реалізації імітаційного моделювання з метою отримання кількісної міри ризику вибраного проектного рішення необхідне наступне:

- вибір базового показника, що визначає стійкість елемента системи;
- вибір розрахункової аналітичної залежності, що пов'язує базовий показник з іншими параметрами;
- розподіл параметрів за ступенем варіації значень на умовно постійні і такі, що змінюються в широких межах;
- визначення статистичних характеристик параметрів зі значною варіацією.

Приймаємо наступні припущення:

- варіація параметрів підлягає закону нормального розподілу;
- відсутня кореляція між параметрами.

Використовуємо програмне забезпечення, яке побудоване на методі Монте-Карло. Успішний приклад застосування даного методу для вирішення задач геомеханіки подано в роботі [11]. Окрім того, використання даного методу рекомендується стандартом [8] (пункт В25). Для реалізації такого підходу для кожного з параметрів програмно задається генерація випадкових чисел з параметрами математичного очікування та стандартного відхилення, що відтворюють реальну розбіжність значень параметра в експериментально отриманій вибірці. На відміну від обмеженої експериментальної вибірки кількість елементів в штучній вибірці має бути набагато більшою і відповідати кількості пробних розрахунків базового параметра згідно аналітичного виразу. При налагоджуванні програмного забезпечення встановлено, що для дотримання вимоги відтворюваності результатів на рівні 98 % кількість пробних розрахунків має становити не менше 5000. В кожному з циклів роботи програми здійснено розрахунок базового параметра за формулою з використанням генерованих випадкових значень вхідних параметрів. Щоб імовірність випадкового значення вхідного параметра була однаковою на протязі всієї сукупності обчислень, здійснювалась його вибірка з поверненням.

По завершенню сукупності розрахунків та упорядкованості даних отримано розподіл можливих значень базового параметра. Незважаючи на нормальний

закон розподілу вхідних параметрів, статистика вибірки значень базового параметра може бути іншою. Певна кількість  $N_1$  елементів вибірки задовольняє вимогам, що визначають експлуатаційну надійність фрагменту системи розробки, а деяка частина  $N_2$  – ні. При коректному виборі вхідних даних слід очікувати, що друга група елементів буде значно менша від першої.

Будемо вважати, що значення параметра, які входять до другої групи, створюють ризик при експлуатації. Тоді складовою кількісною мірою ризику є імовірність  $P$  настання несприятливої події:

$$P = \frac{N_2}{N}. \quad (2)$$

Для прикладу, оцінимо ризик проектного рішення при виборі параметрів камер для умов Артемівського гіпсового родовища (м. Бахмут, Донецька обл.). Базовим параметром є коефіцієнт запасу міцності  $n$ . Прийнято, що для забезпечення стійкого стану покрівлі на невизначено довгий проміжок часу, його значення не повинно бути менше 3 [12]. Величина параметра  $n$  виражається через природні та технологічні чинники наступним чином:

$$n = \frac{m^2 \sigma_{\text{ст}} k_c}{\gamma l^2 (0,25 + 0,00625l)}, \quad (3)$$

де  $m$  – потужність безпосередньої покрівлі, м;  $\sigma_{\text{ст}}$  – міцність порід покрівлі на одновісний стиск, Па;  $k_c$  – коефіцієнт структурного ослаблення масиву;  $\gamma$  – питома вага порід покрівлі, Н/м<sup>3</sup>;  $l$  – проліт камери, м.

Варіація природних характеристик визначається експериментальним шляхом і включає в себе також похибки вимірювання. Необхідна кількість  $N$  визначень параметра для коректного відображення вибіркою властивостей породного масиву задається виразом [13]:

$$N = \left( \frac{2s}{\epsilon} \right)^2 + 2 \quad (4)$$

де  $s$  – реальне або прогнозне стандартне відхилення параметра;  $\epsilon$  – абсолютна похибка визначення параметра. Розмірність вказаних величин визначається відповідним параметром.

Варіація прольоту камери визначається технологічними можливостями дотримання значень даного параметра. В даному випадку мова іде про комбайнову технологію проведення виробок. По замовчуванню статистичний розподіл всіх вихідних параметрів описується нормальним законом розподілу.

Коефіцієнт структурного послаблення масиву має нормативні дискретні значення і умовно вважається постійним.

Основні статистичні дані вихідних параметрів представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики вихідних параметрів для оцінки стійкості безпосередньої покрівлі камери

Категорія параметра	Позначення та розмірність	Математичне очікування $M$	Середнє стандартне відхилення, $s$
Природний	$m$ , м	1,0	0,2
	$\sigma_{ст}$ , Па	$20,1 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$
	$k_c$	0,9	-
	$\gamma$ , Н/м <sup>3</sup>	$23,7 \cdot 10^3$	$0,6 \cdot 10^3$
Технологічний	$l$ , м	10,0	0,8

В результаті обчислювального експерименту з десятьма тисячами визначень коефіцієнту запасу міцності при випадковому виборі значень вихідних параметрів отримана крива імовірності розподілу, яка представлена на рис. 3.

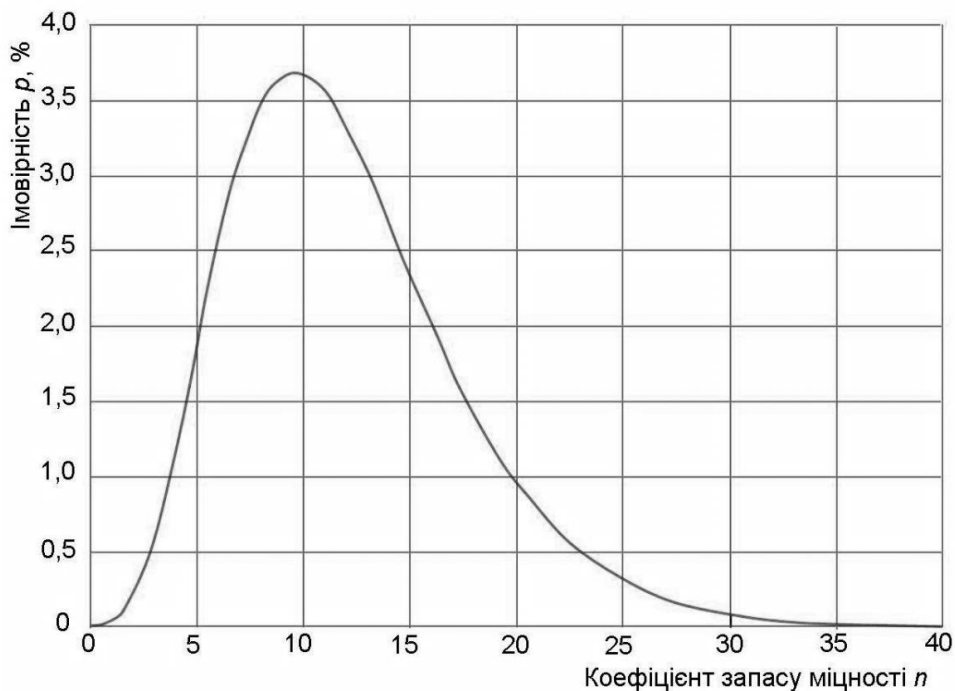


Рисунок 3 – Графік функції розподілу імовірності значень коефіцієнта запасу міцності покрівлі камери

При коефіцієнті запасу міцності  $n \geq 3$  забезпечується стійкість камери на протязі всього терміну експлуатації родовища, яке може тривати десятки років. Негативні наслідки неістотні. При коефіцієнті запасу міцності від 2 до 3 виробка може експлуатуватись при наявності постійного моніторингу за процесами деформації покрівлі. Вказані деформації можуть тривати роками і при налагодженій системі спостережень за станом гірничих виробок негативні наслідки незначні.

При коефіцієнті запасу міцності від 1 до 2 експлуатація камери має бути припинена в найкоротший термін, доступ людей і техніки в камеру закритий. Утворенню вивалів передують інтенсивне формування блоків в покрівлі. На стадії початкового розвитку тріщин процес можна контролювати і певною мірою прогнозувати. Після оформлення блоків він стає непередбачуваним. Дана ситуація може характеризуватись середнім рівнем негативних наслідків.

При коефіцієнті запасу міцності менше одиниці вивал в покрівлі може відбутись вже при оформленні камери. Ситуація є недопустимою і характеризується значними негативними наслідками.

Для визначення імовірності  $P$  настання кожного із перелічених вище випадків необхідно скористатись відношенням:

$$P = \frac{\int_{n_1}^{n_2} p(n)dn}{\int_0^{40} p(n)dn} \quad (4)$$

Оскільки аналітичний вид функції  $p(n)$  нам невідомий, необхідно виконати апроксимацію отриманої залежності. Попередні спроби показали, що для задовільного відтворення форми кривої необхідне використання полінома високого порядку. Більш ефективним є синтез сплайн-функції з трьох окремих фрагментів, кожен з яких задано власним аналітичним виразом. Вигляд вказаної сплайн-функції наведено на рис. 4.

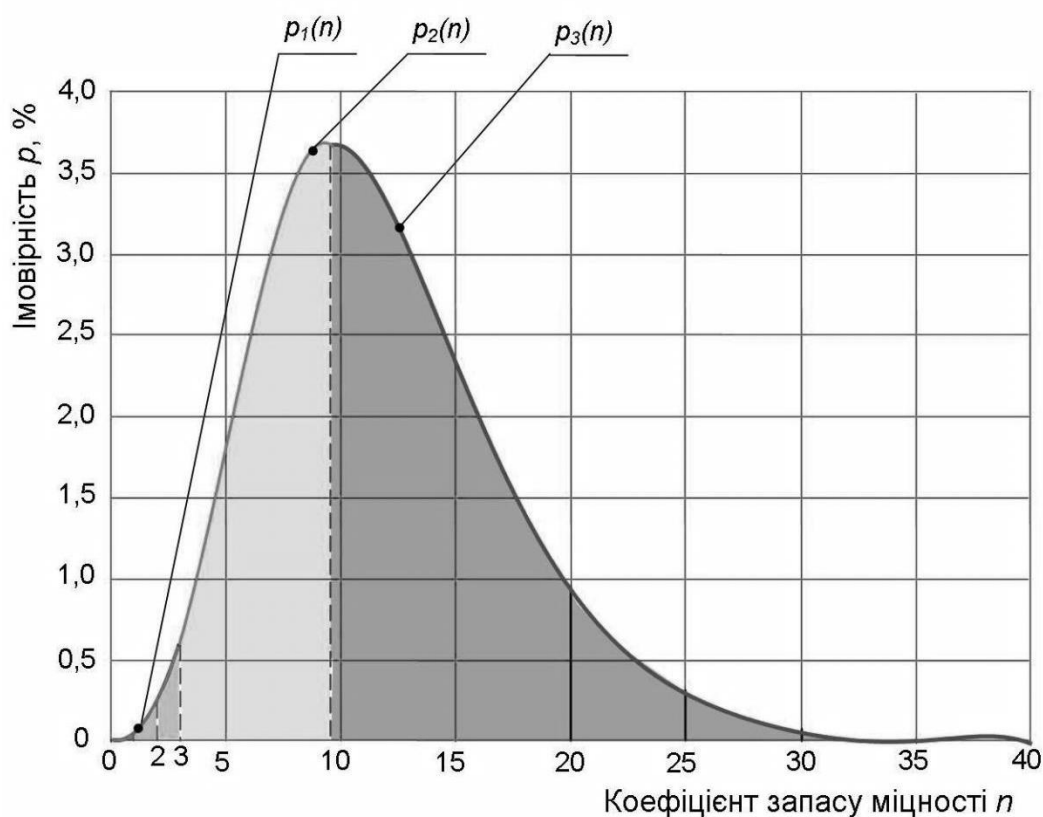


Рисунок 4 – Сплайн-функція для апроксимації кривої розподілу імовірності коефіцієнта запасу міцності



Функціональні залежності окремих фрагментів сплайн-функції подано в табл. 3.

Таблиця 3 – Елементи сплайн-функції

Позначення	Інтервал, $n$	Аналітичний вираз	Достовірність, $R^2$
$p_1(n)$	0-3	$p = 0,08 n^2 - 0,04 n$	0,999
$p_2(n)$	3-9,6	$p = -0,0133 n^3 + 0,2029 n^2 - 0,346 n + 0,1687$	0,999
$p_3(n)$	9,6-40	$p = 10^{-7} n^6 + 2 \cdot 10^{-5} n^5 - 0,0014 n^4 + 0,0486 n^3 - 0,8868 n^2 + 7,8151 n - 22,101$	0,995

Імовірність значних негативних наслідків (при  $n < 1$ ) визначиться наступним чином:

$$P_1 = \frac{\int_0^1 p_1(n) dn}{\int_0^3 p_1(n) dn + \int_3^{9,6} p_2(n) dn + \int_{9,6}^1 p_3(n) dn} = 5,5 \cdot 10^{-5}. \quad (5)$$

Аналогічно обчислюється імовірність наслідків середнього рівня при значенні  $n$  від 1 до 2:

$$P_{1-2} = \frac{\int_1^2 p_1(n) dn}{\int_0^3 p_1(n) dn + \int_3^{9,6} p_2(n) dn + \int_{9,6}^1 p_3(n) dn} = 1,0 \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

Для незначних наслідків при значенні  $n$  від 2 до 3:

$$P_{2-3} = \frac{\int_2^3 p_1(n) dn}{\int_0^3 p_1(n) dn + \int_3^{9,6} p_2(n) dn + \int_{9,6}^1 p_3(n) dn} = 3,3 \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Сумарний ризик  $R_c$ , що викликаний сукупністю можливих наслідків при  $n \leq 3$ , складає:  $R_c = P_1 U_1 + P_{1-2} U_{1-2} + P_{2-3} U_{2-3} = 1,88 \cdot 10^{-5}$ .

Вказане значення, згідно представлених раніше критеріїв, визначає припустимий ризик при застосуванні розробленого проектного рішення для гірничих виробок, що не передбачають постійної присутності підземного персоналу.

**Висновки.** До основних геомеханічних процесів, що спричиняють ризики в процесі експлуатації виробок гіпсової шахти, відносяться: формування блокової структури масиву, розшарування покрівлі, карстоутворення, водопритливи. Представлено градацію негативних наслідків в результаті впливу кожного з процесів. Показано, що вагомим фактором виникнення геомеханічних ризиків є варіація фізико-механічних властивостей породного масиву. Обраховано імовірність недопустимих значень коефіцієнта запасу міцності покрівлі виробки. З врахуванням можливих наслідків при зниженні коефіцієнта запасу

міцності нижче допустимого рівня обчислено відносно величину геомеханічного ризику.

Методика оцінки ризику при визначенні параметрів міжкамерних ціликів має універсальний характер і може бути застосована для оцінки експлуатаційної надійності інженерних об'єктів при значному впливі нестабільних факторів природного походження. При певній адаптації програмного забезпечення вказаний методичний підхід можна застосовувати також в іншій сфері – для оцінки експлуатаційних ризиків рамно-анкерного кріплення вугільних шахт.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подойницын И.П. Анализ организационно-технических мероприятий экологической безопасности при открытой разработке месторождения полезных ископаемых / Вісник Криворізького національного університету. Кривий Ріг : КНУ, 2016. № 43. С. 68-72.
2. Simonenko V., Pavlychenko, A., Cherniaiev, O. Assessment of the ecological efficiency of the open development of nonmetallic deposits of useful minerals / Technology audit and production reserves. 2018. No 5(3). Pp. 21-27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.145602>
3. Gumenic I. and Lozhnikov O. Current condition of damaged lands by surface mining in Ukraine and its influence on environment / Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. London : Taylor & Francis Group, 2015. Pp. 139-144. <https://doi.org/10.1201/b19901-26>
4. Панчуков Н.П., Захаров В.Н., Подольский В.А. Исследование параметров камерно-столбовой системы подземной разработки месторождений гипса / ГИАБ. 2012. № 5. С. 41-44.
5. Зурьян О.В., Левченко А.И., Пидтилок А.М. К вопросу учета неопределенности и риска в геолого-экономическом анализе и стоимостной оценке месторождений / Мінеральні ресурси України. 2015. № 1. С. 38-47.
6. Кириченко С.В. Оценка геомеханического риска при строительстве подземных хранилищ газа / ГИАБ. 2013. № 9. С. 172-177.
7. Нурпеисова М.Б., Кыргызбаева Г.М. Прогноз и управление рисками геомеханических явлений / Горный журнал Казахстана. 2015. № 12. С. 28-31.
8. ДСТУ ІЕС/ІSO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. Київ, 2013. 73 с.
9. Ризик-орієнтований підхід до охорони праці і промислової безпеки у вугільних шахтах: концепція, нормативна база, оцінка і управління ризиками // Булат А.Ф., Бунько Т. В., Кокоулін І. Є. та ін. / Безопасность жизнедеятельности. 2018. №105. С. 313-321. <https://doi.org/10.30838/P.CMM.2415.250918.313.190>
10. Полозов Б.Д., Валиев Н.Г., Кокарев К.В. Особенности имитационного анализа уровней геомеханических рисков горнотехнических объектов / Горный журнал. 2016. №12. С. 8-13. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.02>
11. Сдвижкова О.О., Бабец Д.В. Методика прогноза смещений протяженной горной выработки с учетом статистического разброса свойств горных пород / ГИАБ. 2010. № 1. С. 379-384.
12. Гаркушин П.К., Разоренов Ю.И., Евстигнеев С.Г. Устойчивость кровли камер / ГИАБ. 2003. № 7. С. 120-123.
13. Бакаева О.А. Определение минимального объема выборки / Вестник Мордовского университета. Саранск : НИМГУ, 2010. № 4. С. 111-113.

#### REFERENCES

1. Podoynitsyin, I.P. (2016), "Analysis of organizationally-technical measures of ecological safety at the openwork of deposit of minerals", *Visnyk Krivorizkogo natsionalnogo universitetu*, No. 43, pp. 68-72.
2. Simonenko, V., Pavlychenko, A. and Cherniaiev, O. (2018), "Assessment of the ecological efficiency of the open development of nonmetallic deposits of useful minerals", *Technology audit and production reserves*, No 5(3), pp.21-27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.145602>
3. Gumenic, I. and Lozhnikov, O. (2015), "Current condition of damaged lands by surface mining in Ukraine and its influence on environment", *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, London : Taylor & Francis Group, 2015, pp. 139-144. <https://doi.org/10.1201/b19901-26>
4. Panchukov, N.P., Zaharov, V.N. and Podolskiy, V.A (2012), "Research of parameters of chamber-and-pillar systems of underground development of deposits of gypsum", *GIAB*, No 5, pp. 41-44.
5. Zuryan, O.V., Levchenko, A.I. and Pidtilok, A.M. (2015), "For accounting issues of uncertainty and risk geological and economic analysis and evaluation of deposits cost", *Mineralni resursy Ukrainy*, No 1, pp. 38-47.
6. Kyrychenko, S.V. (2013), "Estimation of geomechanical risk at building of underground stogare of gas", *GIAB*, No 9, pp. 172-177.
7. Nurpeisova, M.B. and Kyrgyzbaeva, G.M. (2015), "Prognosis and management risks of the geomechanical phenomena", *Gornyy zhurnal Kazahstana*, No 12, pp. 28-31.
8. DSTU IEC/ISO 31010:2013(2015), *Keruvannya ryzykom. Metody zagal'nogo otsinyuvannya ryzyku* [Risk management. Risk assessment techniques], DP "UkrNDNTs", Kyiv, Ukraine.

9. Bulat, A.F., Bunko, T. V., Kokoulin, I. E. et al (2018), "Risk-oriented approach to labour and production safety protection in coal mines: conception, normative base, estimation and control by risks", *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, No 105, pp. 313-321. <https://doi.org/10.30838/P.CMM.2415.250918.313.190>

10. Polovov, B.D., Valiev, N.G. and Kokarev, K.V. (2016), "Features of simulation analysis of geomechanical risk levels in mines", *Gorniy zhurnal*, No 12, pp. 8-13. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.02>

11. Sdvizhkova, O.O. and Babets, D.V. (2010), "Methodology of prognosis of displacements of the extensive mountain making taking into account statistical variation of properties of rocks", *GIAB*, No 1, pp. 379-384.

12. Garkushin, P.K., Razorenov, Yu.I. and Evstigneev, S.G. (2003), "Stability of roof of chambers", *GIAB*, No 7, pp. 120-123.

13. Bakaeva, O.A. (2010), "Determination of minimum sample size", *Vestnik Mordovskogo universiteta*, No 4, pp. 111-113.

### Про авторів

**Скіпочка Сергій Іванович**, доктор технічних наук, професор, завідувач лабораторії фізики і геомеханічного моніторингу масивів гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [skipochka@ukr.net](mailto:skipochka@ukr.net)

**Сергієнко Віктор Миколайович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник лабораторії фізики і геомеханічного моніторингу масивів гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [ser1953@meta.ua](mailto:ser1953@meta.ua)

**Амелін Володимир Анатолійович**, магістр, головний технолог лабораторії фізики і геомеханічного моніторингу масивів гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [gips5@ua.fm](mailto:gips5@ua.fm)

**Ситніченко Олег Юрійович**, магістр, шахтний менеджер гіпсової шахти ТДВ «Siniat» міжнародного концерну "Etex Group" (Бельгія), Бахмут, Україна, [oleg.sytnichenko@siniat.com](mailto:oleg.sytnichenko@siniat.com)

### About the authors

**Skipochka Serhii Ivanovych**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Laboratory of Physics and Geomechanical Monitoring of Rocks Mass, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [skipochka@ukr.net](mailto:skipochka@ukr.net)

**Serhiienko Viktor Mykolaiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher in Laboratory of Physics and Geomechanical Monitoring of Rocks Mass, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [ser1953@meta.ua](mailto:ser1953@meta.ua)

**Amelin Volodymyr Anatoliiovych**, Master of Sciences, Chief Technologist in Laboratory of Physics and Geomechanical Monitoring of Rocks Mass, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [gips5@ua.fm](mailto:gips5@ua.fm)

**Sytnichenko Oleh Yuriiovych**, Master of Sciences, Mine Manager of Additional Liability Company «Siniat» of International Concern "Etex Group" (Belgium), Bakhmut, Ukraine, [oleg.sytnichenko@siniat.com](mailto:oleg.sytnichenko@siniat.com)

**Abstract.** In the focus of the article is estimation of geomechanical risks during exploitation of gypsum mines. Underground extraction of gypsum is performed mainly with the use of room-and-pillar system of mining. This method provides long-term exploitation of large mine workings. The maintenance of workings in operation condition for decades is associated with existence of geomechanical risks. They potentially reduce stability of the mine workings. This negatively affects safety of personnel being underground. The long-term consequences are related to the deterioration of the ecological state of the environment. The main geomechanical processes that cause risks in the operation of gypsum mine workings are identified in the publication. Gypsum mine differs by supports installed only in a few sectors. In these conditions, the most dangerous are formation of the block structure of rock mass and stratification of the roof. Uncontrolled development of these processes can cause an emergency situation. Evolution of karst formation above the mine workings can cause caves on the day surface. Great water inflows are also a significant threat. The cases are known when separate sections in the mine field and entire mines were flooded. An approximate gradation of negative consequences as a result of the influence of each geomechanical process is presented. It is shown that a significant factor for the occurrence of geomechanical risks is the changed physical and mechanical properties of the rock mass. In this case, simulation can be used in order to quantify geomechanical risk. Its application for estimating risk of roof falls with known variation of calculated parameters is shown. The result of the simulation is the curve of probability distribution of safety factors of roof. The probability of unacceptable parameter values is calculated. The possible consequences of a gradual decrease of safety factor are taken into account. A quantitative estimate of the magnitude of geomechanical risk for a concrete project was obtained.

This methodology is universal. It can be used to assess operational reliability of engineering objects under significant impact of unstable factors of natural origin.

**Keywords:** geomechanical process, geomechanical risk, gypsum mine, safety factor, simulation.

**Аннотация.** Статья посвящена оценке геомеханических рисков при эксплуатации гипсовых шахт. Подземная добыча гипса осуществляют преимущественно с использованием камерно-столбовой системы. Она предусматривает длительную эксплуатацию горных выработок большого объема. Сохранение выработок в рабочем состоянии на протяжении десятков лет связано с наличием геомеханических рисков. Они потенциально снижают устойчивость горных выработок. Это негативно влияет на безопасность труда подземного персонала. Отдаленные последствия связаны с ухудшением экологического состояния окружающей среды. В публикации выделены основные геомеханические процессы, которые вызывают риски в процессе эксплуатации выработок гипсовой шахты. Особенностью гипсовой шахты является наличие крепи только на отдельных участках. В этих условиях наиболее опасны формирования блочной структуры массива горных пород и расслоения кровли. Неконтролируемое развитие данных процессов может стать причиной аварийной ситуации. Эволюция карстообразования над горной выработкой может вызвать провал на земной поверхности. Значительную угрозу представляют также водопритоки с большим дебитом. Известны случаи затопления отдельных участков шахтного поля и целых шахт. Представлена ориентировочная градация негативных последствий в результате воздействия каждого геомеханического процесса. Показано, что весомым фактором возникновения геомеханических рисков является вариация физико-механических свойств породного массива. В этом случае для количественной оценки геомеханического риска может быть использовано имитационное моделирование. Продемонстрировано его применение для оценки риска обрушения кровли при известных значениях вариации расчетных параметров. Результатом моделирования является кривая вероятности распределения коэффициента запаса прочности кровли. Рассчитана вероятность недопустимых значений параметра. Учтены возможные последствия при поэтапном снижении коэффициента запаса прочности. Получена количественная оценка величины геомеханического риска для конкретного проекта.

Приведенная методика имеет универсальный характер. Она может быть применена для оценки эксплуатационной надежности инженерных объектов при значительном влиянии нестабильных факторов естественного происхождения.

**Ключевые слова:** геомеханический процесс, геомеханический риск, гипсовая шахта, коэффициент запаса прочности, имитационное моделирование.

*Стаття надійшла до редакції 10.12.2020*