

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕХАНІЧНОЇ БЕЗПЕКИ НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

¹Булат А.Ф., ¹Слащова О.А., ¹Слащов І.М., ¹Стаднійчук М.М.

¹*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України*

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

¹Булат А.Ф., ¹Слащева Е.А., ¹Слащев И.Н., ¹Стаднийчук Н.Н.

¹*Інститут геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

SUBSTANTIATION OF METHODS OF GEOMECHANICAL SAFETY CONTROL IN THE MINING ENTERPRISES

¹Bulat A.F., ¹Slashchova O.A., ¹Slashchov I.M., ¹Stadniychuk M.M.

¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

Анотація. Стаття присвячена розвитку методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах з метою можливості їх використання для визначення ризиків втрати стійкості гірничих виробок і прийняття своєчасних рішень з безпеки гірничих робіт. Мета роботи: обґрунтування і систематизація найбільш ефективних методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. Апаратна частина автоматизованої системи контролю безпеки шахт лише фіксує параметри складових частин геотехнічної системи. Однак цього недостатньо. Перш за все, необхідні відпрацьовані методології інтерпретації одержуваної інформації, які включають надійні методи контролю стану породного масиву та проявів гірського тиску в гірничих виробках, обґрунтовані критерії і алгоритми оцінки ризиків. Багато з цих методів використовуються мало через економічні причини, відсутність системності і послідовності їх використання. Але основним є неможливість визначати необхідні параметри і ризики втрати стійкості виробок внаслідок різноманітності, складності, слабкої прогнозованості поведінки гірських порід під впливом гірничих робіт. Тому для прогнозування передаварійних ситуацій в геотехнічній системі, що викликані геомеханічними факторами, запропоновано використовувати апробовану модель теорії випадкових марковських процесів з дискретними станами і безперервним часом на базі лінійної системи диференціальних рівнянь А.М. Колмогорова. Для застосування моделі з оцінки ризиків обґрунтовані найбільш ефективні методи прогнозування напружено-деформованого стану гірських порід і моніторингу гірничих виробок, що дозволяє адекватно ідентифікувати вхідні домінуючі параметри та підвищити безпеку застосування гірничих технологій. Визначені потенційні зміни показників ризиків, що виникають внаслідок впливу фактора обводнення гірських порід та впливають на втрату стійкості гірничих виробок. Отримані залежності, які визначають вихідні умови для ідентифікації стійкості обводненого породного масиву та сприяють створенню технологій підтримання гірничих виробок шахт. Для оцінки стійкості систем кріплення або породного масиву запропоновано метод, який відрізняється проведенням почергового виявлення взаємозалежних і найбільш змінюваних факторів ризику шляхом автоматизованої статистичної обробки величин змін та максимальних темпів змін параметрів у часі. За параметрами періодичних сигналів від контрольованого геомеханічного об'єкта ідентифікуються потенційні ризики виникнення аварійних ситуацій від факторів, які впливають на безпеку гірничих підприємств.

Ключові слова: методи контролю безпеки, ідентифікація факторів ризику, стійкість гірничих виробок, геомеханічні процеси, безпека гірничих робіт.

Руйнування тектонічно порушеного породного масиву призводить до втрати стійкості гірничих виробок шахт та ризиків зниження рівнів безпеки від факторів, що пов'язані з геомеханічними процесами [1]. До основних негативних наслідків слід віднести: втрату стійкості покрівлі, боків і підшви гірничих виробок; раптові обвалення покрівлі; раптові підняття підшви; газодинамічні прояви гірського тиску [1-3]. Для запобігання або зниження ризиків виникнення цих процесів на гірничих підприємствах здійснюють

контроль безпеки і управління технологічними процесами з використанням систем моніторингу параметрів середовища. Цифрові інтелектуальні системи моніторингу і контролю широко застосовуються в багатьох країнах, зокрема, в Великобританії, США, Австралії, Німеччині, Японії, РФ, Китаї, Польщі, Іспанії та ін. Однією з надійних систем в Україні вважається уніфікована телекомунікаційна автоматизована система УТАС[©], яка включає датчики, систему передачі даних і електронно-апаратну складову [4]. На неї покладено функції: індикації параметрів стану контрольованих об'єктів, сигналізації про граничні рівні показників або аварійного стану; передачі, прийому, відображення, реєстрації і накопичення інформації, що надходить від складових частин системи. Разом з цим, апаратна частина автоматизованої системи лише фіксує параметри проявлення процесів. Однак цього недостатньо. Перш за все необхідні відпрацьовані методології інтерпретації одержуваної інформації, які включають надійні ризик-орієнтовані методи контролю стану породного масиву та проявів гірського тиску в гірничих виробках, обґрунтовані критерії і алгоритми оцінки ризиків. Багато з цих методів використовуються мало через економічні причини, відсутність системності і послідовності їх використання, але основним є неможливість визначати необхідні параметри і ризики втрати стійкості виробок внаслідок різноманітності, складності, слабкої прогнозованості поведінки гірських порід під впливом гірничих робіт. Тому обґрунтування і систематизація найбільш ефективних методів контролю геомеханічної безпеки є актуальним завданням. При цьому деякі з методів потребують подальшого розвитку з метою можливості їх використання для визначення ризиків втрати стійкості гірничих виробок і прийняття своєчасних рішень з безпеки гірничих робіт.

Для прогнозування передаварійних ситуацій в геотехнічній системі, що викликані геомеханічними факторами, запропоновано використовувати апробовану модель теорії випадкових марковських процесів з дискретними станами і безперервним часом на базі лінійної системи диференціальних рівнянь А.М. Колмогорова [5], які визначають ймовірність знаходження системи у всіх станах:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{k=0}^n \lambda_{ik} P_k(t) - \sum_{j=0}^n \lambda_{ij} P_j(t), \text{ за умови } \sum_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

де $P_i(t)$ – ймовірність знаходження системи в i -тому стані в поточний момент часу t ; i – номер стану системи, $i=1 \dots n$; λ_{ik} , λ_{ij} – інтенсивності потоків подій, що входять і виходять з i -го стану системи, відповідно.

Інтенсивності потоків подій (1) і потенційні ризики виникнення аварійних ситуацій від різних геомеханічних факторів можна отримувати для умов конкретного підприємства за даними статистики минулих спостережень, поточного об'єктивного контролю та прогнозування стану масиву порід і гірничих виробок. Для застосування цієї моделі з оцінки ризиків систематизовані найбільш ефективні методи прогнозування напружено-

деформованого стану гірських порід і моніторингу гірничих виробок, що дозволяє адекватно ідентифікувати вхідні домінуючі параметри та підвищити безпеку застосування гірничих технологій (рис. 1). Поточний контроль здійснюється з гірничих виробок інструментальними і геофізичними методами (шахтними вимірами зміщень і деформацій, параметрів тріщин, заколів і об'ємів руйнувань та ін.), а також фіксацією параметрів автоматизованими системами. Прогнозування передаварійних ситуацій і розвитку можливих наслідків проявів гірського тиску виконується методами математичного моделювання з визначенням станів масиву порід і гірничих виробок. Разом з тим, далеко не кожен параметр має великий вплив на рівень безпеки ведення гірничих робіт. Тому спочатку необхідно вибрати найбільш ефективні методи і параметри моніторингу, а потім визначити діапазони і межі значень параметрів, при яких можуть виникати аварійні ситуації.

Поточний контроль починають з візуальних спостережень, метою яких є ідентифікація і оцінка зовнішніх пошкоджень виробок, вивалів порід, попереднє визначення границь контрольованих зон. В процесі спостережень визначають можливі шляхи використання різних методів контролю, уточнюють необхідність дотримання особливих вимог з техніки безпеки.

Оперативну інформацію про стан гірських порід і кріплення виробок отримують інструментальними методами шляхом контролю параметрів, до яких відносять тріщини і розшарування прилеглого породного масиву, зміщення покрівлі, підшви і боків виробок. До завдань натурних досліджень входять: контроль зміщень контуру оголень, конвергенції боків і покрівлі-підшви виробок за допомогою зарубок на рамах аркового кріплення та установки контурних реперів; заміри зміщень порід покрівлі і підшви виробок за допомогою глибинних реперів; оцінка зміщень порід по довжині виробок маркшейдерським нівелюванням. Моніторинг проводиться на етапах проведення виробок і всього подальшого терміну їх експлуатації.

У випадках недостатнього обсягу і якості даних, що необхідні для поточної оцінки стану гірничих виробок, виконують геофізичний контроль [6, 7]. Це є ефективним, оскільки зміни, що відбуваються в породному масиві, фіксуються геофізичними методами значно раніше, ніж виявляються візуально. Методи розрізняються за фізичними принципами, що застосовуються апаратурою, точністю і надійністю одержуваних результатів. Наприклад, віброакустичний метод з використанням приладу ІСП-1Ш (індикатор стану покрівлі шахтний) дозволяє визначати небезпечні геомеханічні процеси шляхом контролю суцільності і оцінки відслонень в приконтурному масиві гірських порід (виявлення границь включень, каверн, розшарувань та ін.), вивчати кінетику руйнування. Метод заснований на реєстрації пружних коливань, що збуджені в контрольованому об'єкті. Реєструється частота, амплітуда і час коливань. Оцінка результатів проводиться за найбільшою з амплітудою коливань в частотних смугах, які відображаються індикатором спектра. Так як розбитий тріщинами масив осадових гірських порід, найчастіше є плоскопаралельною структурою, то в замкнутій системі (при $\lambda < 2a/n$, де λ – довжина хвилі, м; n –

номер моди; a – ширина хвилеводу, м) виникають резонансні коливання. Тому можна визначати глибини границь зон тріщиноутворення за критичними частотами перших резонансних мод однорідних нормальних хвиль:

$$a = v_s n / 2 f_r, \quad (2)$$

де a – глибина відшарування, м; v_s – швидкість зсувних хвиль, м / с; f_r – резонансна частота, Гц.

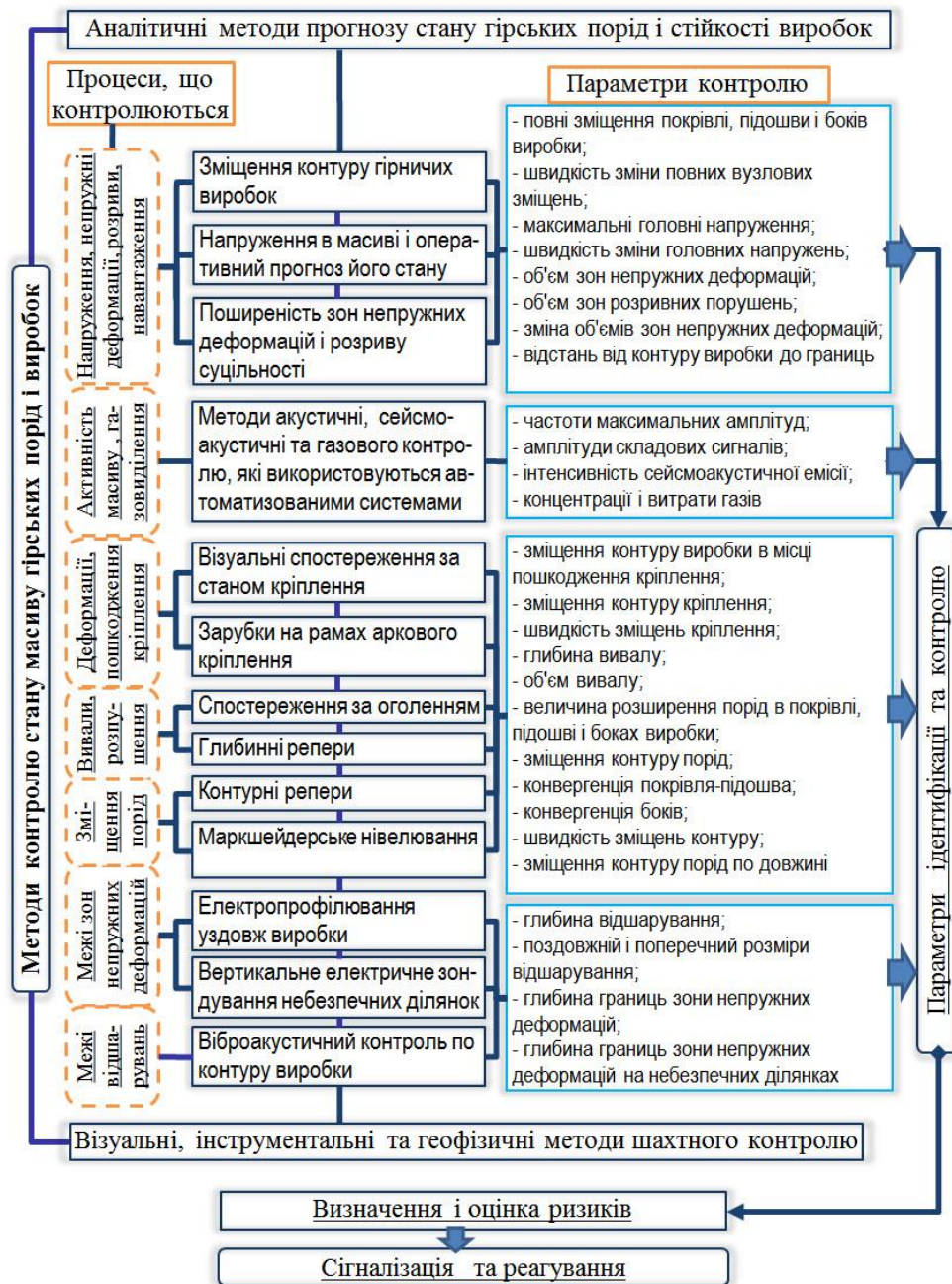


Рисунок 1 – Методи і параметри контролю стану масиву гірських порід для підвищення геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах

З електрометричних методів для отримання первинних даних можливе використання поздовжнього симетричного профілювання і вертикального

електричного зондування (ВЕЗ) на змінному струмі низької частоти. Електричний опір гірських порід залежить від пористості, тріщинуватості та водонасиченості порід, та зі збільшенням пористості і тріщинуватості зменшується (за винятком випадків, коли тріщини заповнені повітрям, що призводить до збільшення опору). Для виконання методу застосовується апаратура ШПС-3М.

Шахтний оперативний контроль передбачає отримання даних вимірів зміщень порід на контурі виробок, деформацій кріплення, розшарувань порід і визначення меж небезпечних зон (відслонень, тектонічних порушень та ін.). Разом з цим, оцінка стану масиву порід і гірничих виробок найбільш ефективна при поєднанні візуального, інструментального та геофізичного контролю з чисельним аналізом напружено-деформованого стану порід методом скінченних елементів [8-11]. Такий підхід дозволяє, з одного боку, перевірити достовірність обчислень, встановити стадію деформаційного процесу і поєднати об'єктивні дані інструментальних досліджень з даними, що отримані в результаті розрахунку станів порід. З іншого боку, моделювання аналітичними методами дозволяє отримати ряд поточних і прогнозованих параметрів, які методами натурних досліджень отримати неможливо або вкрай важко. До таких параметрів, перш за все, відносяться: зони непружних деформацій і розриву суцільності (поширеність, обсяги, межі, швидкість зміни, прогноз, див. рис. 1); напруження в масиві порід (максимальні головні напруження, швидкість зміни, прогноз); прогноз зміщень і форм деформацій контуру гірничих виробок (зміщення покрівлі, підосви, боків, швидкість їх зміни). При цьому геомеханічні стани породного масиву (в першу чергу ті, які становлять небезпеку для персоналу) за вказаними параметрами оцінюються зонально: в покрівлі виробок для попередження вивалів, висипань, завалів; в підосві виробок для попередження раптових підняттях порід і боротьби зі здиманням; в боках виробок для попередження видавлювання і раптових деформацій порід; в зоні впливу засобів охорони виробок. Оцінка напружено-деформованого стану масиву порід проводиться шляхом чисельної реалізації аналітичних рішень геомеханічних задач з використанням комплексу програмного забезпечення, наприклад, системи GEO-RS[©] [12-15].

Найбільш інформативними для оперативної оцінки геотехнічної обстановки є автоматизовані системи контролю масиву порід і гірничих виробок. Зокрема, акустичні і сейсмоакустичні методи, які використовують автоматизовані системи (наприклад, АПСС-1, ЗУА-98) дозволяють в режимі реального часу фіксувати амплітуди складових сигналів, частоти максимальних амплітуд, інтенсивність сейсмоакустичної емісії. Визначається енергетична активність масиву порід і параметризація розшарувань покрівлі. Для реалізації способу контролю застосовується апаратура, що уловлює звук. Присутність в акустичній емісії декількох періодичних складових може свідчити про розшарування порід і різний крок осаду кожної зі складових частин покрівлі. Активність сейсмоакустичної емісії є параметром, що дозволяє оцінити процеси тріщиноутворення. В даний час розроблені і застосовуються на шахтах

два способи. Перший спосіб заснований на використанні тільки одного параметра – кількості імпульсів в одиницю часу. Другий – на визначенні спектральної складової акустичної емісії з періодом в 21 добу. Перевищення значення цієї складової встановленого граничного рівня характеризується як аномалія. Одним із завдань, що вирішуються цим методом, є контроль напруженого стану масиву порід, осад покрівлі, оцінка потужності порід, що відшарувалися.

Надійне визначення ризиків втрати стійкості виробок в умовах гірничих виробництв, що можуть привести до травмування робочих та значних економічних втрат, необхідно використовувати методи, які базуються або на статистично значущій кількості параметрів процесів, що вже трапилися, або на визначених закономірностях передбачуваної поведінки породного масиву [16, 17]. Такі методи застосовуються в ядерній і авіаційній промисловості, де відмова ряду складних систем може привести до дуже небажаних результатів.

Стосовно до геотехнічної системи, потенційний ризик $R(E^t)$ виникнення аварійної ситуації від впливу фактору E^t в момент часу t (ймовірність реалізації несприятливого розвитку подій) необхідно визначати для кожного з елементів цієї системи, де повний ризик являє собою суму індивідуальних ризиків окремих значень домінуючих інформативних параметрів. При цьому інтенсивності потоків, що входять і виходять з i -го стану системи (1) представляють собою зміни параметрів контролю під впливом відповідного фактора ризику, який впливає на стійкість елементів геотехнічної системи.

В якості прикладу, визначимо потенційні зміни показників ризиків, що виникають внаслідок впливу фактора обводнення гірських порід та впливають на втрату стійкості гірничих виробок. Ймовірність події, якщо ми знаємо, що обводнення порід вже відбулося, дорівнює одиниці. Тому звичайна міра ризику для окремого класу факторів, наприклад, для фактору зниження міцності обводнених гірських порід (один з наслідків процесу обводнення), визначається тільки наслідками від цього процесу:

$$R(\sigma^w) = P^w k^t (\Delta \sigma_e^{*w}), \quad (3)$$

де P^w – ймовірність обводнення гірських порід, відн. од; k^t – коефіцієнт впливу на потенційний ризик відносного зниження міцності обводнених гірських порід, відн. од.; $\Delta \sigma_e^{*w}$ – відносні зміни міцності при обводненні

$$\Delta \sigma_e^{*w} = 100 \sigma_e^{*w} / \sigma_e^*, \quad \%, \quad (4)$$

де σ_e^* , σ_e^{*w} – межі міцності на стиснення у сухому і водонасиченому стані, Па.

Рівень водонасичення порід приймався рівним нулю для зразків в сухому стані і дорівнювався 100 % для зразків порід з максимально-можливим рівнем водонасичення зразків, яке досягалося в умовах лабораторних експериментів або в реальному масиві порід (рис. 2).

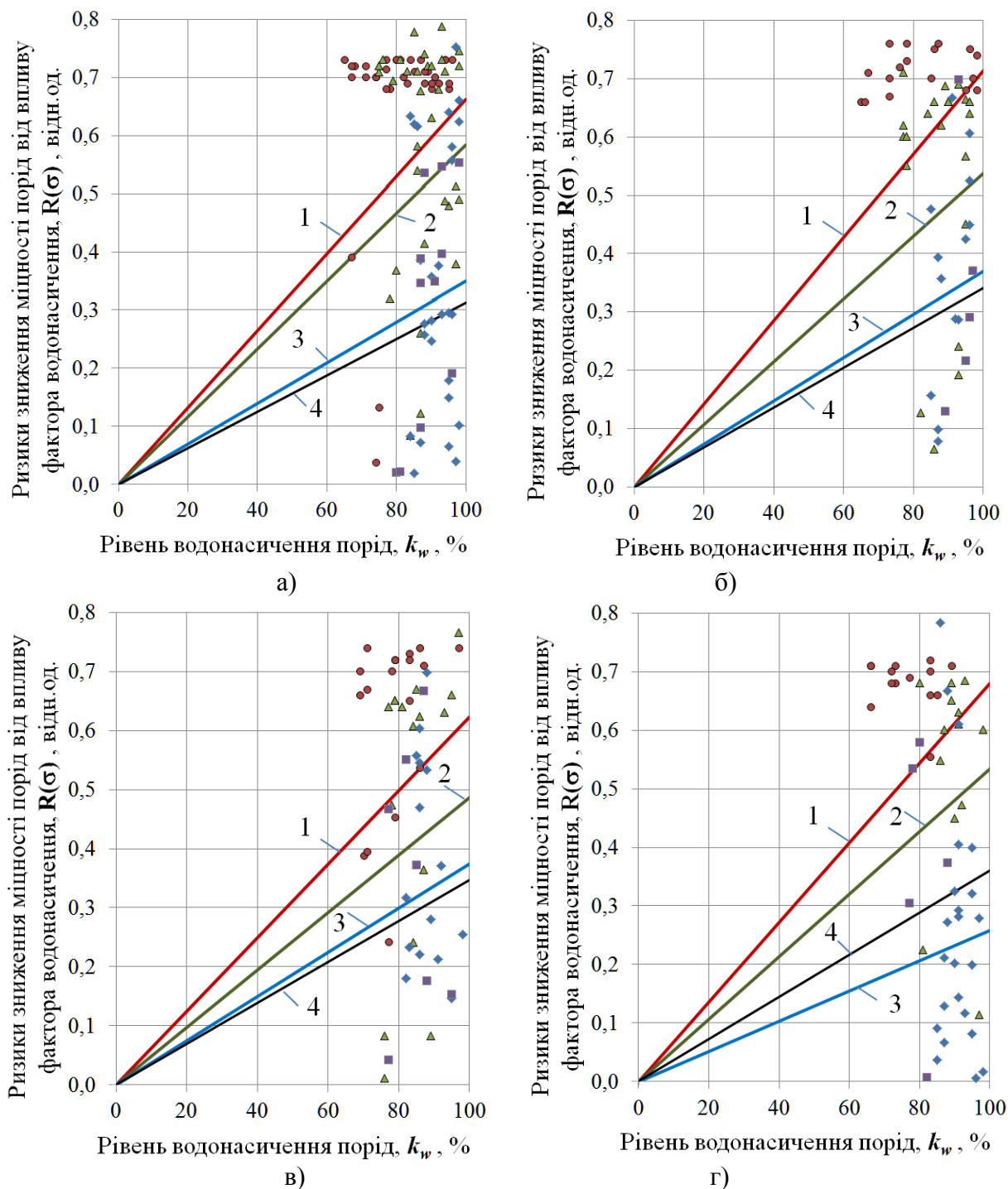


Рисунок 2 – Ризики зниження міцності від впливу фактора обводнення гірських порід: а, б, в, г – для глибин 400-600 м, 600-800 м, 800-1000 м і 1000-1200 м, відповідно; 1 (●), 2 (▲), 3 (◆), 4 (■) – залежності зміни ризиків для аргілітів, алевролітів, пісковиків і вапняків, відповідно

Рівні ризиків зниження міцності гірських порід (наслідків процесу обводнення) можна об'єднати в декілька інтервалів з градаціями параметрів (шириною смуг), які в інформаційних системах безпеки можуть оброблятися методами нечіткої логіки [18, 19]. Залежності, які встановлюють параметри зниження міцності і ризики від зниження міцності обводнених гірських порід визначено для інтервалів глибин 400-600 м, 600-800 м, 800-

1000 м і 1000-1200 м (табл. 1). Встановлено, що водонасичення порід для всіх інтервалів глибин призводить до зниження їх міцності в 1,5-2,0 рази (для пісковиків і вапняків) і 2,5-3,0 (для алевролітів і аргілітів). Середньоквадратичне відхилення не перевищує 22 %. Отримані залежності визначають вихідні умови для ідентифікації стійкості обводненого породного масиву та створення ризик-орієнтованих технологій підтримання гірничих виробок шахт.

Таблиця 1 – Ідентифікація фактора ризику від впливу обводнення масиву порід

Глибина, м	Порода	Коефіцієнти k^I в регресійних моделях (3), що визначають ризики зниження міцності від впливу фактора обводнення	Середньоквадратичне відхилення, %
400-600	Аргіліти	0,662	8,9
	Алевроліти	0,584	15,9
	Пісковики	0,350	19,2
	Вапняки	0,313	16,8
600-800	Аргіліти	0,713	3,1
	Алевроліти	0,538	15,4
	Пісковики	0,370	14,6
	Вапняки	0,340	15,5
800-1000	Аргіліти	0,623	12,2
	Алевроліти	0,487	20,8
	Пісковики	0,374	15,4
	Вапняки	0,347	19,1
1000-1200	Аргіліти	0,680	3,0
	Алевроліти	0,533	13,5
	Пісковики	0,258	15,6
	Вапняки	0,360	16,3

Оцінка стану гірничотехнічної системи включає відсів помилкових значень, фільтрацію і аналіз вхідних сигналів систем моніторингу, аналіз взаємозв'язків між параметрами пов'язаних процесів, алгоритми обробки подій, обчислення інтегральних параметрів та інших індикаторів безпеки системи «кріплення-масив». Програмні алгоритми можуть бути налаштовані на вироблення та передачу сигналів небезпеки, а також на ініціалізацію створення керівних інструкцій, що регламентують виконання технічних заходів та допомагають забезпечити працездатність геотехнічної системи і безпеку праці.

Помилкові значення при роботі автоматизованих систем з'являються внаслідок помилок в датчиках збору і системах обробки інформації, збоїв в аналого-цифрових перетворювачів, зашумлення сигналів в лініях зв'язку і ін. Використовуються такі основні способи відсіву грубих похибок: фільтрація, усереднення (згладжування) та відсів значень, довірча ймовірність яких менше допустимої, або вони не потрапляють в визначений довірчий інтервал. Застосування цифрової фільтрації цільових перевірок доцільно на системах реального часу в тих випадках, коли частотні області спектра перешкод не

перетинаються з частотними областями спектру корисного сигналу (наприклад, перешкоди силових ліній або високочастотні шуми). Відсів помилкових значень з числа багатьох вхідних параметрів контрольованої системи може бути проведений почерговим виявленням взаємозалежних і найбільш змінюваних параметрів шляхом автоматизованої статистичної обробки послідовно по два значення масиву контрольованих параметрів. Для цього запропоновано використовувати метод, що заснований на порівнянні величини зміни досліджуваного параметра x за час кроку вибірки Δt з максимальним значенням модуля темпу зміни параметра $V_{\max}$. Значення x_i параметра вважається дійсним, якщо виконуються умови

$$\begin{cases} x_{\min} \leq x_1 \leq x_{\max} \\ \left| \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right| \leq \left| \frac{dx}{dt} \right| = V_{\max} \end{cases}, \quad (5)$$

де $x_{\min}$ і $x_{\max}$ – мінімально і максимально можливі значення параметрів; x_i – значення параметра x в момент часу t_i , $i=1 \dots n$; n – об'єм вибірки.

Помилкові значення параметра не відповідають умові (3) замінюються значенням, що апроксимується $x_i = x_{i-1} \pm V_{\max} \cdot \Delta t$. Після відсіву інформативні параметри використовуються в подальшому для критеріальної оцінки стійкості системи кріплення або породного масиву.

Зрозуміло, що сигнали від контрольованого геомеханічного об'єкта можна уявити сумою кінцевого числа періодичних сигналів за якими ідентифікуються потенційні ризики виникнення аварійних ситуацій від факторів, які впливають на безпеку гірничих підприємств. Це дозволяє автоматизувати контроль об'єктів на основі виділених періодичних сигналів в режимі реального часу.

Таким чином, для прогнозування передаварійних ситуацій в геотехнічній системі, що викликані геомеханічними факторами, запропоновано використовувати апробовану модель теорії випадкових марковських процесів з дискретними станами і безперервним часом на базі лінійної системи диференціальних рівнянь А.М. Колмогорова. Для застосування моделі з оцінки ризиків обґрунтовані найбільш ефективні методи прогнозування напружено-деформованого стану гірських порід і моніторингу гірничих виробок, що дозволяє адекватно ідентифікувати вхідні домінуючі параметри та підвищити безпеку застосування гірничих технологій. Визначені потенційні зміни показників ризиків, що виникають внаслідок впливу фактора обводнення гірських порід та впливають на втрату стійкості гірничих виробок. Отримані залежності, що визначають вихідні умови для ідентифікації стійкості обводненого породного масиву та створення ризик-орієнтованих технологій підтримання гірничих виробок шахт.

Для оцінки стійкості систем кріплення або породного масиву запропоновано метод, який відрізняється проведенням почергового виявлення взаємозалежних і найбільш змінюваних параметрів ризику шляхом автоматизованої статистичної обробки величин змін та максимальних темпів змін параметрів у часі. За параметрами періодичних сигналів від контрольованого геомеханічного об'єкта

ідентифікуються потенційні ризики виникнення аварійних ситуацій від факторів, які впливають на безпеку гірничих підприємств.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ідентифікація факторів ризиків втрати стійкості гірничих виробок / Слащов І.М. та ін. Геотехнічна механіка. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 209-222.
2. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. М.: Недра, 1987.
3. Булат, А.Ф., Слащев, И.Н., Слащева, Е.А. Комплексирование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепр, 2017. № 134. С. 3-21.
4. Дердін О. Система «УТАС» – презумпція безальтернативності / Все про охорону праці. 2009, № 10. С. 2-9.
5. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 534 с.
6. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1989. 488 с.
7. Иконников М.Ю. и др. Математическое моделирование в задачах оценки эффективности и безопасности горных работ / Иконников М.Ю. и др. Днепропетровск: Национальный горный ун-т, 2015. 215 с.
8. Слащева Е.А. Разработка экспресс-методики прогноза устойчивости геоматериалов по изменению их электропроводящих свойств под воздействием гидрогеологических факторов // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 2003. № 42. С. 143-148.
9. Слащева Е.А., Слащев И.Н., Яланский А.А. Особенности решения геомеханических задач для условий обводненного газонасыщенного массива горных пород // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 2014. № 115. С. 232-244.
10. Slashchov I.M., Shevchenko V.G., Kurinnyi V.P., Slashchova O.A., and Yalanskyi O.A. (2019) Forecast of potentially dangerous rock pressure manifestations in the mine roadways by using information technology and radiometric control methods. *Mining of Mineral Deposits*, no. 13(4), pp. 9-17.
11. Slashchov I.M. (2019), Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method, *E3S Web of Conferences*, Vol. 109.
12. Слащев И.Н., Шевченко В.Г., Слащев А.И. Оптимизация информационной системы оперативного прогноза геомеханических процессов для поддержки принятия решений по безопасности шахт // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 2013. № 112. С. 129-144.
13. Шевченко В.Г., Слащев А.И. Информационные системы безопасности и производительности подземных горных работ. Київ: Наукова думка, 2018. 285 с.
14. Слащев И.Н. Разработка математической модели и технологии компьютерного анализа тектонически нарушенного структурно-неоднородного породного массива // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 2012. № 104. С. 94-109.
15. Булат А.Ф., Слащев И.Н. Разработка компьютерных систем математического моделирования геомеханических процессов // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 2012. № 99. С. 16-27.
16. Слащев, И.Н., Слащева Е.А. Исследование процесса формирования зон разрушения в породном массиве при отработке смежных выемочных участков шахт // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 2016. № 128. С. 179-191.
17. Слащев А.И. Совершенствование цифровой системы прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 2018. № 141. С. 216-231.
18. Слащев И.Н. и др. Иерархическая модель формализации нечеткого логического вывода для цифровых систем оценки устойчивости горных выработок // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. Днепр, 2019. № 149. С. 122-131.
19. Слащев А.И., Яланский А.А. (2019). Обоснование алгоритмов нечеткой логики для задач контроля геотехнических систем. *E3S Web of Conferences*, Vol. 109.

REFERENCES

1. Slashchov I.M. et al. (2019), "Identification of risk factors of mine workings stability loss", *Geotekh. meh.*, no. 149, pp. 209-222. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.209>
2. Glushko, V.T., Yamshchikov, V.S. and Yalanskyi, A.A. (1987), *Geofizicheskiy kontrol v shakhtakh i tonneliakh* [Geophysical control in mines and tunnels], Nedra, Moscow, SU.
3. Bulat, A.F., Slashchov, I.N. and Slashchova O.A. (2017), "Evaluation methods of interconnected geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif for the systems of working medium control in the mines", *Geotekh. meh.*, no. 134, pp. 3-21.
4. Derdin, O. (2009), "The "UTAS" system is a presumption of non-alternativeism", *Everything about labor protection*, no. 10, pp. 2-9.
5. Kolmogorov, A.N. (1986), *Teoriya veroiatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics], Nauka, Moscow, SU.
6. Turchaninov, I.A., Iosif, M.A. and Kasparyan, E.V. (1989), *Osnovy mekhaniki gornyykh porod* [Fundamentals of Rock Mechanics], Nedra, Leningrad, SU.

7. Ikonnikov M.YU. et al. (2015), *Matematicheskoe modelirovanie v zadachakh otsenki effektivnosti i bezopasnosti gornyykh rabot* [Mathematical modelling in solving problems of evaluating the efficacy and safety of mining operations], Natsionalnyy gornyy universitet, Dnipropetrovsk, UA.
8. Slashchova O.A. (2003), "Working out of the express-method of the forecast geomaterials stability about changing their conductivity characteristics under influence of the hydrogeological factors", *Geotekh. meh.*, no. 42, pp. 143-148.
9. Slashchova, O.A., Slashchov, I.N. and Yalanskiy, A.A. (2014), "Features solutions for problems of geomechanical watery gas-saturated rock massif", *Geotekh. meh.*, no. 115, pp. 232-244.
10. Slashchov I.M., Shevchenko V.G., Kurinnyi V.P., Slashchova O.A., and Yalanskyi O.A. (2019) Forecast of potentially dangerous rock pressure manifestations in the mine roadways by using information technology and radiometric control methods. *Mining of Mineral Deposits*, no. 13(4), pp. 9-17.
<https://doi.org/10.33271/mining13.04.009>
11. Slashchov I.M. (2019), "Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method", *E3S Web of Conferences*, Vol. 109.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900094>
12. Slashchov I.M., Shevchenko V.G. and Slashchov A.I. (2013), "Optimized information system for on-line predicting of geomechanical process behavior and ensuring proper decision-making on the mine safety", *Geotekh. meh.*, no. 112, pp. 129-144.
13. Shevchenko, V.G. and Slashchov, A.I. (2018), *Informatsionnye sistemy bezopasnosti i proizvoditelnosti podzemnykh gornyykh rabot* [Information systems for underground mining safety and productivity], Naukova Dumka, Kyiv, UA.
14. Slashchov, I.M. (2012), "The development of mathematical model and technology of computer analysis of tectonically disturbed structurally-heterogeneous rock massif", *Geo-Technical Mechanics*, no. 104, pp. 94-109.
15. Bulat, A.F. and Slashchov, I.N. (2012), "Development of computer systems mathematical modeling geomechanical processes", *Geo-Technical Mechanics*, no. 99, pp. 16-27.
16. Slashchov I.N. and Slashchova O.A. (2016), "Study of caving zone formation in the rock massif at mining adjacent panels in the mines", *Geotekh. meh.*, no. 128, pp. 179-191.
<https://doi.org/10.15407/geotm2018.141.216>
17. Slashchov A.I. (2018). "Improvement of the digital system for the rock stress-strain state forecasting", *Geotekh. meh.*, no. 141, pp. 216-231.
<https://doi.org/10.15407/geotm2018.141.216>
18. Slashchov A.I., Slashchov I.M., Osinnaya N.V. and Konstantynova I.B. (2019), "The hierarchical model of fuzzy logic output formalization for digital systems evaluating mine workings stability", *Geotekh. meh.*, no. 149, pp. 122-131.
<https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.122>
19. Slashchov A.I. and Yalanskyi O.A. (2019), "Substantiation of fuzzy logic algorithms for control problems of a geotechnical systems", *E3S Web of Conferences*, Vol. 109.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900091>

Про авторів

Буллат Анатолій Федорович, академік Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, директор інституту, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, gtm.bulat@gmail.com

Слащов Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, IMSlashchov@nas.gov.ua

Слащова Олена Анатоліївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, OASlashchova@nas.gov.ua

Стаднійчук Микола Миколайович, магістр, головний конструктор у відділі проблем шахтних енергетичних комплексів, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, krosh1983@gmail.com

About the authors

Bulat Anatolii Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, gtm.bulat@gmail.com

Slashchov Ihor Mykolaiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, IMSlashchov@nas.gov.ua

Slashchova Olena Anatoliivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, OASlashchova@nas.gov.ua

Stadnnychuk Mykola Mykolaiovych, Master of Science, Chief Designer in Department of Mine Energy Complexes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov NAS of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, krosh1983@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена развитию методов контроля геомеханической безопасности на горных предприятиях с целью возможности их использования для определения рисков потери устойчивости горных выработок и принятия своевременных решений по безопасности горных работ. Цель работы: обоснование и систематизация наиболее эффективных методов контроля геомеханической безопасности на горных предприятиях. Аппаратная часть автоматизированной системы контроля безопасности шахт только фиксирует параметры составных частей геотехнической системы. Однако этого недостаточно. Прежде всего, необходимы отработанные методологии интерпретации получаемой информации, включающие надежные методы контроля состояния породного массива и проявлений горного давления в горных выработках, обоснованные критерии и алгоритмы оценки рисков. Многие из этих методов используются мало по экономическим причинам, отсутствия системности и последовательности их использования. Но основным является невозможность определять необходимые параметры и риски потери устойчивости выработок в результате разнообразия, сложности, слабой прогнозируемости поведения горных пород под воздействием горных работ. Поэтому для прогнозирования предаварийных ситуаций в геотехнической системе, вызванных геомеханическими факторами, предложено использовать апробированную модель теории случайных марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем на базе линейной системы дифференциальных уравнений А.М. Колмогорова. Для применения модели оценки рисков обоснованы наиболее эффективные методы прогнозирования напряженно-деформированного состояния горных пород и мониторинга горных выработок, что позволяет адекватно идентифицировать входные доминирующие параметры и повысить безопасность применения горных технологий. Определены потенциальные изменения показателей рисков, возникающие вследствие обводнения горных пород и влияющие на потерю устойчивости горных выработок. Получены зависимости, которые определяют исходные условия для идентификации устойчивости обводненного породного массива и способствуют созданию технологий поддержания горных выработок шахт. Для оценки устойчивости систем крепления или породного массива предложен метод, который отличается проведением поочередного выявления взаимосвязанных и наиболее изменяемых факторов риска путем автоматизированной статистической обработки величин изменений и максимальных темпов изменений параметров во времени. По параметрам периодических сигналов от контролируемого геомеханического объекта идентифицируются потенциальные риски возникновения аварийных ситуаций от факторов, влияющих на безопасность горных предприятий.

Ключевые слова: методы контроля безопасности, идентификация факторов риска, устойчивость горных выработок, геомеханические процессы, безопасность горных работ.

Annotation. The article is devoted to the development of methods for monitoring geomechanical safety in the mining enterprises in terms of their use for determining risks of mine roadway stability loss and making timely decisions on the safety of mining operations. Purpose of the work was substantiation and systematization of the most effective methods for monitoring geomechanical safety in the mining enterprises. Hardware of the automated mine safety monitoring system just records parameters of components of the geotechnical system. However, this is not enough. First of all, well-proven methodologies are needed for interpreting the information received including reliable methods for monitoring of the rock massif state and rock pressure manifestations in mine workings, and well-founded criteria and risk assessment algorithms. Many of these methods are used little for economic reasons and absence of systemacy and consistency of their use. But the key reason is an impossibility to determine the necessary parameters and risks of mine roadway stability loss due to the diversity, complexity and poor predictability of the rock behavior under the influence of mining operations. Therefore, for predicting pre-emergency situations in geotechnical system caused by geomechanical factors, it is proposed to use a proved model of the Markov theory of random processes with discrete states and continuous time based on the linear system of the A.M. Kolmogorov differential equations. In order to apply the risk assessment model, the most effective reasonable methods for forecasting of the rocks stress-strain state and monitoring of mine workings are substantiated, which allow to adequately identify the input dominant parameters and improve the safety of mining technologies. Potential changes in risk indicators arising from waterlogging of rocks and affecting the mine roadway stability loss are identified. Dependencies are established, which determine the initial conditions for identifying waterlogged rock mass stability and contribute to the creation of technologies for roadway supporting. A method is proposed for assessing supporting system or rock massif stability, which is distinguished by alternately identifying of interrelated and most variable risk factors by automated statistical processing of the amount of changes and the maximum rate of parameter change over time. Potential risks of emergency situations caused by factors affecting the mining enterprises safety are identified by parameters of periodic signals received from geomechanical object under the control.

Keywords: safety control methods, identification of risk factors, mine roadway stability, geomechanical processes, mining operation safety.

Стаття надійшла до редакції 16.02. 2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук А.О. Яланським