Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

UDC 622.271:622.235:624.131

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Elnikova E.A., Guzenko A.D. Influence of Near-Contour Rock-Mass Jointing on Bench Stability under Changes in Drilling and Blasting Parameters

Влияние трещиноватости приконтурного массива на устойчивость уступов при изменении параметров буровзрывных работ

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow
Yelnikova Elena Aleksandrovna,
Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal University, Magadan.
Guzenko Aleksey Dmitrievich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва
Ельникова Елена Александровна,
Старший преподаватель кафедры ЭТиС
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Гузенко Алексей Дмитриевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *A model-based assessment separates joint persistence from residual blast damage in bench stability. Three hypothetical post-blast states are defined by P-wave velocity ratios of 0.80, 0.90 and 0.96. For a 15 m bench, persistence P = 0.5 and pore-force ratio ru = 0.15, the calculated factor of safety increases from 1.029 to 1.303. At P = 0.7, even the least-damaged state yields F = 1.006, decreasing to 0.907 at ru = 0.30. Lower damage therefore does not compensate for adverse structure and water pressure. All inputs are hypothetical; no field-calibrated relationship between blasting settings and strength is claimed. The calculation concerns residual static stability, not the transient blast response.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

***Keywords**: open-pit bench, joint persistence, rock bridge, drilling and blasting, blast damage, acoustic velocity, slope stability.*

***Аннотация.** Предложена модельная оценка остаточной устойчивости уступа с раздельным учётом связности трещин и послевзрывного повреждения. Для условного уступа высотой 15 м исследованы три состояния массива, заданные отношением скоростей продольной волны 0,80; 0,90 и 0,96. При связности P = 0,5 и отношении поровой силы к нормальной ru = 0,15 коэффициент устойчивости возрастает с 1,029 до 1,303. При P = 0,7 улучшение ограничено: F = 1,006 для наименее повреждённого состояния и 0,907 при ru = 0,30. Параметрический эксперимент показывает, что снижение повреждения не компенсирует неблагоприятную структуру и обводнение. Схемы БВР сопоставлены по условным результатам воздействия, без вывода причинной зависимости из несуществующих полевых данных. Все исходные числа — авторские допущения; полученные коэффициенты не заменяют проектный расчёт.*

***Ключевые слова:** уступ карьера, трещиноватость, скальные перемычки, связность трещин, буровзрывные работы, повреждение, акустическая скорость, устойчивость.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Устойчивость приконтурного массива определяется не только количеством трещин, но и их ориентировкой, протяжённостью, заполнением и сохранностью скальных перемычек. После взрыва изменяются раскрытие и связность существующих нарушений и могут возникать новые. Поэтому одинаковая вибрационная интенсивность не означает одинакового повреждения двух геологических доменов, а уменьшение PPV само по себе не доказывает достаточную остаточную устойчивость.

Zhang и соавторы показывают вариативность поверхности разрушения при различных реализациях сети несплошных трещин [1]. Испытания Guo и соавторов подтверждают несущую роль перемычек и потерю сопротивления при их объединённом разрушении [2]. Al-E'Bayat и соавторы разделяют механизмы для сплошных и несплошных нарушений [3]. Многоуровневый учёт структурных поверхностей с применением фотограмметрии представлен Wang и соавторами в выпуске 2026 г. [4].

Hao и соавторы исследуют локальную динамическую реакцию трещиноватого склона на взрывную волну [5]. Sun и соавторы [6] и Lu и соавторы [7] связывают оценку вибрации с геометрией, прочностью и свойствами волн. Эти работы не устанавливают единый допустимый PPV для всех уступов. В статье Liu и соавторов [8] показано изменение повреждения при разных схемах предварительного щелеобразования, а Xie и соавторы [9] выявляют асимметрию повреждения слоистого массива. Ультразвуковая оценка начальной повреждённости рассмотрена в [10].

Цель исследования — количественно показать совместное влияние связности нарушений, остаточного повреждения и воды на статический запас устойчивости условного блока. Методический вклад — прозрачный баланс сил и проверка ограничений интерпретации акустического индикатора. Новая полевая зависимость

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

прочности от параметров зарядов не заявляется: для неё в исходных материалах отсутствуют испытания.

Материалы и методы. Область применимости

Сравнивается одна плоская призма на 1 м простирания. Предполагаются выходящая в откос поверхность $\beta < \alpha$, отсутствие анкерного усиления, пригрузки, задней водонаполненной трещины и боковых удерживающих сил. Это проверочный экран сценариев, а не полный расчёт уступа с несколькими системами трещин. Для клина, опрокидывания и пространственного step-path механизма требуется другая модель [1, 3, 4].

Таблица 1

Общие параметры: авторские сценарные допущения

Параметр	Значение
Высота H; угол откоса α	15 м; 70°
Угол условной поверхности β; удельный вес γ	45°; 26 кН/м³
Приведённое сцепление перемычек cb	100 кПа; не прочность целого образца
Исходный угол трения $\varphi 0$; снижение $\Delta\varphi$	34°; 8° на единицу DV
Связность P; отношение поровой силы ru	0,3–0,7; базово 0,15
Контрольный уровень F*	1,20 — исследовательский, не норматив

Материалы и методы. Структура и повреждение

$$P = \frac{\sum l_j}{\sum l_j + \sum l_b} \quad (1)$$

P — линейная связность вдоль рассматриваемого пути, lj и lb — длины трещин и перемычек. Это не число трещин на метр и не 3D-показатель проницаемости. Короткие следы на обнажении не позволяют непосредственно восстановить весь потенциальный путь скольжения [1–4].

$$W = \frac{\gamma H^2}{2}(cot\beta - cot\alpha);\ L = H/sin\beta \quad (2)$$

$$D_V = 1 - (Vp, \text{после}/Vp, \text{до})^2 \quad (3)$$

DV — условный акустический индикатор. Квадрат отношения скоростей соответствует изменению упругого параметра лишь при сопоставимых плотности и коэффициенте Пуассона. Влажность, разгрузка, анизотропия и схема прозвучивания также изменяют скорость [10]. DV не тождествен коэффициенту нарушения D критерия Hoek–Brown и не определяет прочность автоматически.

$$c_e = c_b(1 - P)(1 - D_V);\ \varphi_e = \varphi_0 - \Delta\varphi D_V \quad (4)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Зависимости (4) — авторские функции чувствительности, а не подтверждённые эмпирические законы. Приведённое сцепление агрегирует вклад перемычек; одновременная мобилизация всех участков может завышать сопротивление. Последовательное разрушение и концентрация напряжений прямо не моделируются [2, 3].

Таблица 2

Сценарии изменения БВР и условные состояния после воздействия

Сценарий	Сопоставляемый подход	Vp,после/Vp,до	DV
А	Исходная приконтурная технология	0,80	0,3600
Б	Снижение воздействия; контроль точности бурения	0,90	0,1900
В	Контуросберегающий подход и контроль результата	0,96	0,0784

Таблица 2 не задаёт паспорт взрыва. Изменения плотности воздействия, буферной зоны, точности и последовательности работ должны проверяться опытными блоками [8, 9]. Числа отношения скоростей присвоены сценариям, а не рассчитаны по зарядам и не измерены на предприятии; причинный эффект каждого приёма отдельно не идентифицирован.

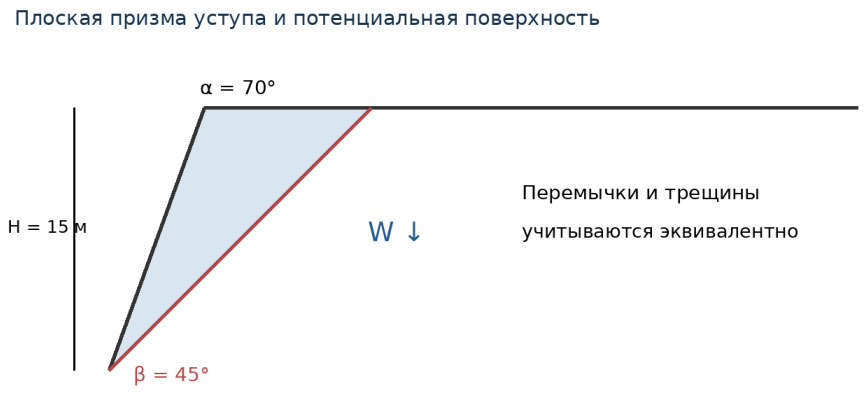


Рисунок 1 — Условная геометрия призмы

Результаты. Остаточная статическая устойчивость

$$N = W\cos\beta;\ T = W\sin\beta;\ U = r_u N \quad (5)$$

$$F = \frac{c_e L + (N-U)\tan\varphi_e}{T} \quad (6)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

N, T, U — нормальная, сдвигающая и суммарная поровая силы, кН/м; L — площадь пути на 1 м простирания, м²/м. В расчёте N > U. Формула (6) оценивает состояние после затухания вибраций; динамический минимум F и возможность кратковременного смещения не определяются. Заменять волну постоянным ускорением без временной модели здесь не предлагается.

Таблица 3

Коэффициент F при ru = 0,15

Связность P	A: DV = 0,36	Б: DV = 0,19	B: DV = 0,0784
0,3	1,236	1,455	1,600
0,5	1,029	1,194	1,303
0,7	0,823	0,933	1,006

По таблице 3 при P = 0,5 переход A → B повышает F с 1,029 до 1,303, или на 26,60 %. При P = 0,7 для B получено лишь 1,006. Следовательно, меньшая повреждённость не компенсирует высокую связность трещин. Значения около единицы особенно чувствительны к ошибкам исходных параметров и не являются подтверждением эксплуатационной безопасности.

Пошаговая проверка сценария Б при P = 0,5

W = 0,5 × 26 × 15² × (cot45° − cot70°) = 1860,387 кН/м. L = 15/sin45° = 21,213 м²/м. N = T = 1315,492 кН/м; U = 0,15 × 1315,492 = 197,324 кН/м. При DV = 0,19: ce = 100 × 0,5 × 0,81 = 40,5 кПа; φe = 34 − 8 × 0,19 = 32,48°. Тогда F = [40,5 × 21,213 + (1315,492 − 197,324)tan32,48°]/1315,492 = 1,194183. Сценарный уровень 1,20 не достигается; он не объявлен нормативным.

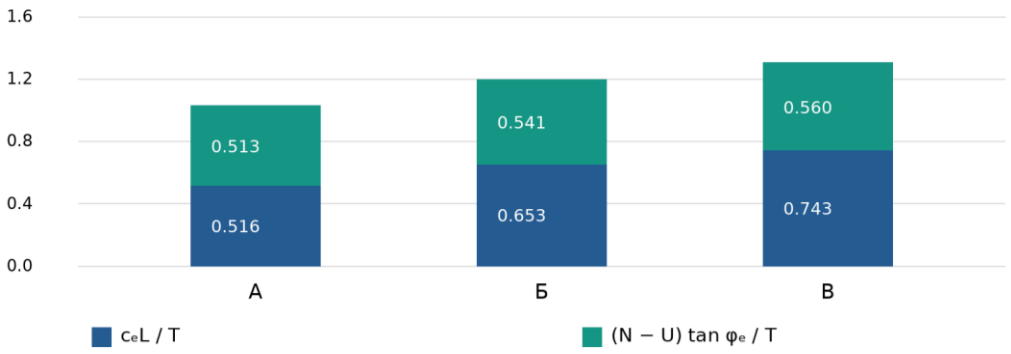


Рисунок 2 — Состав удерживающего сопротивления при P = 0,5; источник — модельный расчёт

Рисунок 2 показывает, что в выбранной постановке основная прибавка связана с сохранением вклада перемычек, а не только с небольшим изменением угла трения.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Такой результат зависит от принятого cb и должен проверяться по испытаниям, а не распространяться на все литологии.

Результаты. Связность трещин и влияние воды

	D_V=0.0	D_V=0.1	D_V=0.2	D_V=0.3	D_V=0.4
P=0.3	1.702	1.572	1.442	1.313	1.184
P=0.4	1.541	1.427	1.313	1.200	1.087
P=0.5	1.380	1.282	1.184	1.087	0.990
P=0.6	1.218	1.137	1.055	0.974	0.894
P=0.7	1.057	0.992	0.926	0.862	0.797
P=0.8	0.896	0.846	0.797	0.749	0.700

Цвета: интервалы F < 1; 1–1,2; ≥ 1,2. Значение 1,2 — не норматив.

Рисунок 3 — Совместное влияние P и DV при ru = 0,15;
источник — модельный расчёт

Рисунок 3 отделяет два фактора: природную структуру P и дополнительное состояние повреждения DV. Даже при малом DV рост P существенно снижает вклад перемычек. Повторный учёт одного и того же нарушения одновременно как увеличения P и уменьшения cb недопустим без обоснования. В этом эксперименте P фиксируется для каждого домена, а DV меняется между сценариями.

$$P_{lim} = 1 - \frac{[F* - (1-r_u)tan\varphi_e/tan\beta]Wsin\beta}{c_b(1-D_V)L} \quad (7)$$

Условие F ≥ F* при положительном знаменателе даёт P ≤ Plim. При F* = 1,20 и ru = 0,15 получены Plim = 0,334; 0,496 и 0,569 для А, Б и В. Это границы только выбранной алгебраической модели; они не являются допустимой трещиноватостью по нормативному документу.

Таблица 4

Вода при наименее повреждённом состоянии В

ru	F при P = 0,5	F при P = 0,7
0,00	1,402	1,105
0,15	1,303	1,006
0,30	1,204	0,907

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

По таблице 4 при P = 0,7 рост ru от 0 до 0,30 снижает F с 1,105 до 0,907. Ранжирование БВР по акустической скорости без контроля воды может ошибочно приписать эффект взрыву или скрыть неблагоприятный гидравлический фактор. ru — отношение суммарной поровой силы к N, а не высота воды и не универсальный коэффициент для любых поверхностей.

Практически сравнивать опытные участки следует при одинаковых геометрии и структурном домене, документируя осадки, дренаж и состояние трещин. Если после взрыва возникла открытая задняя трещина с водой, данная геометрическая схема уже неполна; необходимо учитывать дополнительные силы и изменение блока.

Результаты. Оценка неопределённости

Выполнено 100 000 синтетических сочетаний на сценарий (seed = 20261022). Заданы независимые равномерные P ∈ [0,3;0,7], cb ∈ [80;120] кПа, φ0 ∈ [32;36]°, ru ∈ [0,05;0,25]. Отношение скоростей нормально распределено около 0,80; 0,90; 0,96 с СКО 0,02 и ограничено [0,5;1]. Общие структурные и водные реализации одинаковы между сценариями; ошибки скорости сгенерированы отдельно. Эти распределения не оценены по натурной выборке.

$$f_{<1} = \frac{1}{n}\sum I(F_i < 1) \quad (8)$$

Таблица 5

Результаты параметрического моделирования

Сценарий	Среднее F	5%-ный квантиль	95%-ный квантиль	Доля F < 1, %
А	1,030	0,811	1,280	44,80
Б	1,195	0,924	1,506	15,09
В	1,303	0,998	1,654	5,18

По таблице 5 среднее F для В равно 1,303, но 5%-ный квантиль — 0,998. Поэтому расчёт только по средним исходным параметрам скрывает часть неблагоприятных сочетаний. Доля F < 1 снижается с 44,80 до 5,18 % между А и В, однако это не вероятность аварии на карьере: она условна относительно произвольно заданных распределений и упрощённого механизма.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

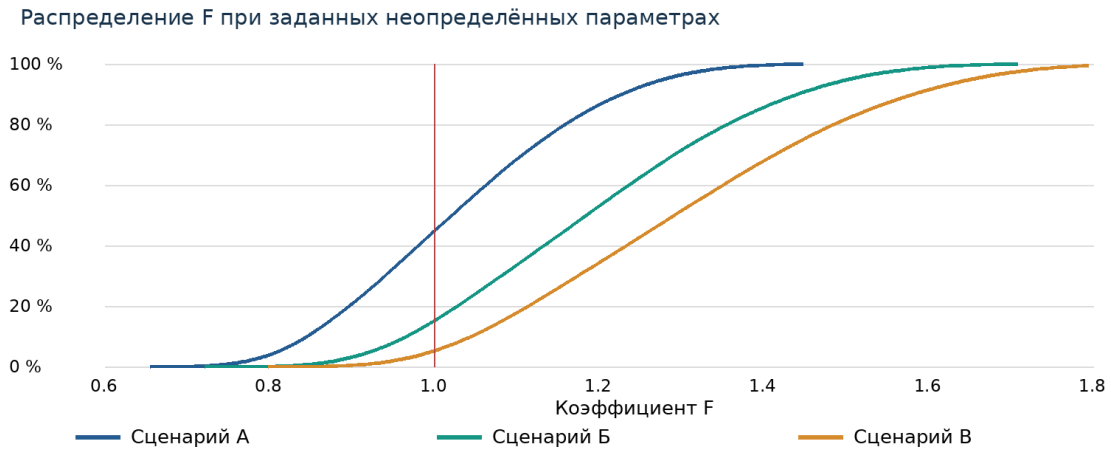


Рисунок 4 — Эмпирические функции распределения F; источник — синтетическое моделирование

Рисунок 4 показывает смещение распределения, а не изменение реальной частоты обрушений. Для оценки надёжности нужны пространственная статистика трещин, подтверждённые прочностные параметры, корреляции и вероятность рассматриваемого механизма. Влажность может одновременно повышать U и менять акустическую скорость, нарушая принятую независимость. Монте-Карло не компенсирует неверную физическую модель.

Воспроизводимость обеспечена явной геометрией, единицами и законами входных параметров. При генерации не выполнялась подгонка под желательное значение F. Проверены совпадение формулы силового баланса и раздельного суммирования вкладов, а также корректность размерности кПа × м²/м = кН/м.

Обсуждение

Основной результат — условность формулировки «щадящий взрыв обеспечивает устойчивость». Сохранение массива уменьшает повреждение, но исходная ориентировка и связность трещин могут определять поверхность скольжения независимо от улучшения технологии [1–5]. Для уже связанного пути вклад перемычек мал; тогда необходимы изменение геометрии, водопонижение, усиление или иной проектный приём, обоснованный специалистами. Статья не назначает конкретные параметры зарядов и сети скважин.

Сценарии А–В нельзя считать испытанными паспортами БВР. Для причинного вывода необходимы сопоставимые опытные блоки, запись фактической геометрии

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

бурения, параметров воздействия и временных рядов вибрации, повторное акустическое профилирование и исполнительная съёмка. Одновременное изменение нескольких параметров не позволяет выделить их отдельные эффекты. Результаты [8, 9] подтверждают необходимость объектовой проверки, а не переносимости их оптимальных настроек.

DV характеризует изменение волнового отклика вдоль конкретных лучей. Изменение насыщения или напряжений может изменить скорость без эквивалентной потери сцепления [10]. Поэтому функции (4) должны калиброваться по независимой прочностной информации. Если нарушенный слой занимает лишь часть возможной поверхности, применение одинакового се ко всему L консервативно или неконсервативно в зависимости от локализации перемычек; требуется зональная модель.

Ограничения включают плоскую схему, линейную агрегацию сопротивления, отсутствие динамики, пространственного клина, раскрытой задней трещины и прогрессирующего разрушения. Расчётное $F > 1$ не означает соответствия проектным требованиям. Уровень $F^* = 1{,}20$ введён исключительно для анализа чувствительности. Внешние признаки угрозы, отказы основы и новые смещения требуют действий по утверждённым процедурам, без ожидания завершения сравнительного эксперимента.

Выводы

1. Раздельный учёт P и DV показывает, что сохранность перемычек и природная связность нарушений нельзя заменять одним интегральным показателем «трещиноватости».

2. При $P = 0{,}5$ и $ru = 0{,}15$ условное снижение DV с 0,36 до 0,0784 повышает остаточный статический F с 1,029 до 1,303. Результат относится к принятой геометрии и авторским зависимостям прочности.

3. При $P = 0{,}7$ сценарий B даёт $F = 1{,}006$; при $ru = 0{,}30$ — 0,907. Уменьшение повреждения не устраняет влияния структуры и воды.

4. В синтетическом ансамбле 5%-ный квантиль F для B равен 0,998. Долю $F < 1$ нельзя объявлять частотой аварий: распределения и физическая схема требуют натурной валидации.

5. Обоснование изменения БВР должно включать контроль геологии, акустики, вибраций и фактического контура. Модель предназначена для предварительной оценки и не заменяет проект устойчивости.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Zhang W., Wang J., Xu P., Lou J., Shan B., Wang F., Cao C., Chen X., Que J. Stability evaluation and potential failure process of rock slopes characterized by non-persistent fractures // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2020. — Vol. 20. — P. 2921–2935. — DOI: 10.5194/nhess-20-2921-2020.

2. Guo Q., Pan J., Cai M., Zhang Y. Investigating the Effect of Rock Bridge on the Stability of Locked Section Slopes by the Direct Shear Test and Acoustic Emission Technique // Sensors. — 2020. — Vol. 20, no. 3. — Art. 638. — DOI: 10.3390/s20030638.

3. Al-E'Bayat M., Guner D., Sherizadeh T., Asadizadeh M. Numerical Investigation for the Effect of Joint Persistence on Rock Slope Stability Using a Lattice Spring-Based Synthetic Rock Mass Model // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, no. 2. — Art. 894. — DOI: 10.3390/su16020894.

4. Wang J., Zhang W., Chen D., Yin H., Chen J. Multi-Scale Structural Geological Model and Quantification of Stability Evaluation for a High-Steep Fractured Rock Slope // Journal of Earth Science. — 2026. — Vol. 37, no. 2. — P. 703–721. — DOI: 10.1007/s12583-023-1953-9.

5. Hao Y., Zhao G.-F., Yang T. [et al.]. A coupled numerical method to study the local stability of jointed rock slopes under long-distance bench blasting // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. — 2022. — Vol. 8. — Art. 153. — DOI: 10.1007/s40948-022-00466-3.

6. Sun J., Jia Y., Zhang Z., Yao Y. Study on blast-induced ground vibration velocity limits for slope rock masses // Frontiers in Earth Science. — 2023. — Vol. 10. — Art. 1098630. — DOI: 10.3389/feart.2022.1098630.

7. Lu S., Yao Y., Jia Y., Sun J., Zhang Z. PPV Criterion of a Defect Rock Slope under Blasting SV-Waves // Shock and Vibration. — 2022. — Vol. 2022. — Art. 4308193. — 10 p. — DOI: 10.1155/2022/4308193.

8. Liu J., Li X., Tai C., Hu T., Xu J. Study on Delay Time and Rock Mass Damage Patterns in Pre-Split Blasting of Water-Saturated Skarn in Alpine Regions // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, no. 4. — Art. 1776. — DOI: 10.3390/app15041776.

9. Xie L., Zhang J., Yang D., Qi Y., Wu L., Chen H. Research on Damage Evolution Mechanism of Layered Rock Mass under Blasting Load // Buildings. — 2024. — Vol. 14, no. 10. — Art. 3227. — DOI: 10.3390/buildings14103227.

10. Liu J., Xuan S., Liu G. A Study on the Damage Evolution Law of Layered Rocks Based on Ultrasonic Waves Considering Initial Damage // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, no. 19. — Art. 9076. — DOI: 10.3390/app14199076.