



Физико-математический анализ многостадийного процесса взрывного разрушения горных пород

Д.В. Молдован ✉, К.Н. Ястребова, В.И. Чернобай

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ moldovan_dv@pers.spmi.ru

Резюме: В статье рассматривается динамика перехода высокоинтенсивного ударного воздействия от детонации взрывчатого вещества к квазистатическому расширению полости под давлением продуктов взрыва. Основное внимание уделяется механизмам формирования зон разрушения: полости взрыва, дробления и трещинообразования. Подробно исследуется ключевая роль акустического согласования сред на границе «взрывчатое вещество–порода» через концепцию волнового импеданса, а также эволюция волны сжатия в массиве. На основе уравнений состояния предлагаются расчетные зависимости для определения критических параметров взрывного воздействия, таких как максимальное давление на фронте волны, радиусы зон разрушения и остаточное давление в полости. Представленный физико-математический аппарат создает научную основу для оптимизации технологий взрывных работ. Целенаправленный подбор типа взрывчатого вещества, конструкции заряда и схемы инициирования на основе анализа волновых и прочностных процессов позволяет повысить энергетическую эффективность взрыва, контролировать гранулометрический состав разрушенной породы и минимизировать негативные воздействия (сейсмические эффекты, переизмельчение).

Ключевые слова: взрывное разрушение горных пород, детонация, волновой импеданс, ударная волна, волна сжатия, полость взрыва, зона дробления, зона трещинообразования, давление продуктов взрыва, квазистатическое нагружение, динамическое нагружение, уравнение состояния

Для цитирования: Молдован Д.В., Ястребова К.Н., Чернобай В.И. Физико-математический анализ многостадийного процесса взрывного разрушения горных пород. *Горная промышленность*. 2026;(4S):217–222. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-217-222>

Physical and mathematical analysis of the multistage blast rock fragmentation process

D.V. Moldovan ✉, K.N. Yastrebova, V.I. Chernobai

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ moldovan_dv@pers.spmi.ru

Abstract: The article examines dynamics of the transition from high intensity shock action caused by detonation of the explosive to the quasi-static expansion of the cavity formed by the explosion products. The main focus is placed on the formation mechanisms of the damage zone, i.e. creation of the blast cavity, fragmentation, and crack initiation. The study looks closely at the key role of acoustic matching at the explosive–rock interface through the wave impedance concept, as well as development of the compression wave within the rock mass. The presented physical and mathematical tools create a scientific foundation for optimizing blasting technologies. Targeted selection of the explosive type, charge design, and blasting system based on analyzing wave and strength processes makes it possible to increase the energy efficiency of the blast, control the particle size distribution in the muck pile, and minimize negative impacts, e.g. seismic effects, over-crushing).

Keywords: blast fragmentation of rocks, detonation, wave impedance, shock wave, compression wave, blast cavity, fragmentation zone, crack initiation zone, explosion product pressure, quasi-static loading, dynamic loading, JWL state equation

For citation: Moldovan D.V., Yastrebova K.N., Chernobai V.I. Physical and mathematical analysis of the multistage blast rock fragmentation process. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):217–222. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-217-222>



Введение

Взрыв в горной породе представляет собой многостадийный, высокоэнергетический процесс, охватывающий динамические и квазистатические фазы, начинающийся с детонации взрывного вещества (ВВ) и завершающийся формированием взрывной полости, зон разрушения и сложной системы трещин, а при наличии свободной поверхности – также выбросом породы. Этот процесс нельзя свести к простому механическому воздействию: он представляет собой сложное взаимодействие ударных волн, газодинамических процессов и механических свойств породы.

Несмотря на резкий рост вычислительных мощностей и внедрение систем расчета параметров, позволяющих автоматизировать технологические процессы, и возможность создания достоверных прогнозных моделей, по-прежнему существует возможность отсутствия надежных методов описания состояния горного массива в момент взрывного воздействия и начала движения горной массы [1].

При расчете буровзрывных работ (БВР) необходимо знать физико-механические свойства горных пород (предел прочности на сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.). В рамках современного энергетического метода расчета массы скважинного заряда, учитывающего изменчивость свойств пород в массиве, эти характеристики выступают ключевыми параметрами для проектирования эффективного взрыва. В частности, актуальным направлением является применение методов цифрового моделирования для прогнозирования параметров развала взорванной горной массы, что напрямую зависит от исходных физико-механических свойств породного массива [2; 3].

Точное определение физико-механических свойств горных пород на лабораторном оборудовании требует не только соблюдения методик, но и внедрения современных подходов к управлению качеством всего технологического процесса испытаний. Для этого общие принципы анализа качества контроля технологического процесса, разработанные для промышленных систем [4], могут быть адаптированы для минимизации погрешностей на всех этапах – от отбора керна до фиксации результатов на испытательном оборудовании. Перспективным направлением для решения этих задач является разработка специализированных программных продуктов, аналогичных тем, что создаются для контроля сложных сборочных операций [5–8].

Взрывная полость, образованная детонационной волной и давлением газов, продолжает расширяться за счёт энергии расширяющихся продуктов взрыва. Процесс расширения замедляется по мере роста давления в полости, пока оно не сравняется с пределом прочности породы на сдвиг [9]. С этого момента динамическое воздействие переходит в квазистатическое давление газов и начинает действовать как медленно нарастающая нагрузка, вызывая раскрытие трещин, сдвиговых и пластических перемещений в зоне разрушения. Именно на этом этапе формируются сеть радиальных, кольцевых и случайно ориентированных трещин, а также отколы у свободной поверхности, традиционно именуемые этапом предварительного разрушения. Процесс завершается, когда расширение полости прекращается [10].

На третьем этапе разрушенная горная масса продолжает движение по инерции, при этом куски породы взаимодействуют друг с другом, сталкиваются и дробятся,

формируя воронку выброса или развал. Именно на этом этапе завершается формирование гранулометрического состава взорванной массы, являющегося основным параметром оценки эффективности буровзрывных работ [11; 12].

Для более точного прогнозирования и оптимизации параметров взрывного разрушения горной породы (блочная отбойка, контурное взрывание, дробление горной массы и т.д.) необходимо знать влияние режимов разрушения:

- 1) динамического нагружения – за счёт ударных и упругих волн, действующих в первой фазе разрушения;
- 2) квазистатического нагружения – за счёт давления газов, определяющего масштаб и направленность сдвижения и выброса.

Список критериев объединяет особенности горных работ и физико-механические характеристики породного массива [13–15]. Повсеместное углубление и усложнение горно-геологической среды трансформируется в экспоненциальный рост геомеханических угроз, способных эскалировать в системные техногенные катастрофы, – тренд, консолидированно зафиксированный в аналитике надзорных органов, научных институтах и оперативной практике горнодобывающих компаний [16; 17].

Методы

Влияние процесса можно было описать в термодинамической модели преломления ударных волн, учитывающей необратимые процессы в горной породе при сверхзвуковом нагружении:

$$\frac{p_{\Phi}}{\rho_{\Pi} C_{\Pi}^2} = \frac{1}{A} \left[\left(\frac{p_{\Phi}}{\rho_{\Pi}} \right)^m - 1 \right], \quad (1)$$

где ρ_{Π} – плотность породы, кг/м³; C_{Π} – скорость распространения продольных волн в породе, м/с, $C_{\Pi} = C_p$; C_p – скорость распространения поперечных волн в породе, м/с; p_{Φ} – максимальное давление в преломленной волне; A и m – безразмерные численные коэффициенты в уравнении ударной адиабаты.

Такой подход позволяет перейти от эмпирического подбора ВВ к целенаправленному проектированию взрывных технологий [18].

Для динамических условий (высокочастотные импульсы, трещиноватые породы) требуются коррекции, включая учёт вязкоупругих свойств [19].

Традиционные подходы к моделированию взрывного воздействия на породу ограничиваются квазистатическими оценками давления на границе ВВ – породе. Реальная же физика процесса – это динамическая трансформация ударного импульса через сложный, неоднородный массив [20; 21], где энергия не просто передаётся, а переконфигурируется.

Максимальное давление в преломлённой волне $P_{\max}$ не может быть вычислено аналитически в общем виде [22].

Гоголев предложил графоаналитический метод [23]: построение кривой $f(P) = 0$ в координатах P и v , где $f(P)$ – функция, получаемая из баланса импульса и уравнения состояния. Точка пересечения этой кривой с осью $v = 0$ даёт $P_{\max}$ – максимальное давление, переданное породе.

Для ускорения вычислений используются итерационные методы (Ньютона, секущих) [24], при этом начальное приближение выбирается как:



$$P^{(0)} = P_d \cdot \left(\frac{2 \cdot \rho_p \cdot C_p}{\rho_c D + \rho_p C_p} \right).$$

Для удлинённых зарядов (длина) максимальная амплитуда радиальной волны (в килопаскалях) описывается как:

$$\sigma_r^{\max} = 1,2 P_d \cdot \left(\frac{R_c}{r} \right)^{0,7}. \quad (2)$$

Для длинных зарядов (длина), где длина соизмерима с линией наименьшего сопротивления, используется модифицированная зависимость:

$$\sigma_r^{\max} = 1,2 P_d \cdot \left(\frac{R_c}{r} \right)^{0,5} \cdot \left(1 + \frac{L}{150 R_c} \right). \quad (3)$$

Тангенциальная составляющая волны напряжений имеет более сложную структуру, обусловленную анизотропией породы и геометрией заряда. Для цилиндрических зарядов:

$$\sigma_r^{\max} = k_1 \cdot \sigma_r^{\max} \cdot \left(\frac{C_s}{C_p} \right)^{k_2}, \quad (4)$$

где k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от акустической жёсткости породы.

Одно из наименее изученных явлений – деструктивное ослабление волны при пересечении трещин [25–27].

Эффективность комплексной разработки характеризуется естественными трещинами, и тектонические сдвиги, кривые образцы проходят полный спектр лабораторных испытаний.

В зависимости от амплитуды и длительности нагрузки порода подвергается различным степеням повреждения: от полного измельчения до упругого деформирования [28; 29].

Результаты

Теоретические и экспериментальные исследования [30; 31] показывают, что расширение полости взрыва определяется балансом между давлением продуктов детонации P_0 и сопротивлением породы сдвиговым деформациям. Максимальный радиус полости R_p и остаточное давление в ней P_g при достижении равновесия зависят от начального давления P_0 , плотности породы ρ , её прочности на сдвиг τ_d , а также скорости распространения поперечной волны C_s .

На основе анализа данных взрывных испытаний и численного моделирования [32–34] получена эмпирическая зависимость.

Радиус зоны дробления R_f определяется условием достижения критического уровня сдвиговых напряжений в упругопластической волне сжатия.

Согласно модели, предложенной в работах, радиус зоны дробления связан с начальным давлением и параметрами породы следующим соотношением:

$$R_f = R_p \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{P_0}{\tau_d} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

где β – эмпирический коэффициент, зависящий от типа породы, для песчаников и известняков: для гранитов и базальтов: $\beta = 0,05–0,08$.

Радиус зоны трещинообразования R_c определяется как расстояние, на котором амплитуда сдвиговых напряжений падает до уровня, достаточного для инициации микротрещин, но недостаточного для полного разрушения, в соответствии с моделью фрактального затухания [35; 36].

При условии что критическое напряжение для инициации трещин $\sigma_{crit} \approx 0,1 \cdot \tau_d$, радиус зоны трещинообразования определяется как:

$$R_c \approx R_f \cdot 10^{\frac{2}{3}} \approx R_f \cdot (10)^{\frac{1}{n}}, \quad (6)$$

где n – показатель затухания.

Заключение

Взрывное разрушение является сложным многостадийным процессом, последовательно включающим динамическую фазу (иницирование ударной волной, смятие и дробление), квазистатическую фазу (расширение полости и рост трещин под давлением газов) и инерционную фазу (сдвиг и формирование рельефа). Эффективность разрушения определяется не изолированным действием одного из механизмов, а их синергетическим взаимодействием.

Ключевым фактором, определяющим эффективность передачи энергии от заряда ВВ в массив породы, является акустическое согласование (импеданс) среды, максимальный коэффициент передачи энергии достигается при близких значениях волновых сопротивлений ВВ и породы ($Z_{ВВ} \approx Z_{порода}$). Нарушение этого условия ведет либо к значительным энергетическим потерям (при $Z_{ВВ} \ll Z_{порода}$), либо к неоптимальному, избыточному дроблению (при $Z_{ВВ} \gg Z_{порода}$).

Структура конечного разрушения (размеры полости, зон дробления и трещинообразования) может быть количественно оценена с помощью предложенных эмпирико-аналитических зависимостей, связывающих энергию взрыва, прочностные и деформационные характеристики породы. Эти модели позволяют перейти от эмпирического подбора параметров взрыва к целенаправленному прогнозированию его результатов.

Существенное влияние на процесс разрушения оказывает внутренняя неоднородность горного массива (трещины, слоистость, включения). Реальное разрушение представляет собой в значительной степени активацию и развитие существующих дефектов, а не создание новой поверхности в сплошной среде. Это накладывает ограничения на применимость аналитических моделей, разработанных для идеализированных условий, и требует учета структурных особенностей конкретного массива.

Представленный физико-математический аппарат создает научную основу для оптимизации технологий взрывных работ. Целенаправленный подбор типа ВВ, конструкции заряда и схемы инициирования на основе анализа волновых и прочностных процессов позволяет повысить энергетическую эффективность взрыва, контролировать гранулометрический состав разрушенной породы и минимизировать негативные воздействия (сейсмические эффекты, переизмельчение).



Список литературы / References

1. Маховиков А.Б., Филясова Ю.А. Цифровые технологии при добыче твёрдых полезных ископаемых в Арктике. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(3):1110–1117. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1110-1117>
Makhovikov A.B., Filyasova Yu.A. Information technologies for solid mineral extraction in the Arctic. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):1110–1117. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1110-1117>
2. Хохлов С.В. Применение методов цифрового моделирования для прогнозирования параметров развала взорванной горной массы. *Записки Горного института*. 2025;275:196–204. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16650> (дата обращения: 28.03.2026).
Khokhlov S.V. Application of digital simulation methods for predicting parameters of blasted rock muckpile. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:196–204. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16650> (accessed: 28.03.2026).
3. Хохлов С.В., Виноградов Ю.И., Маккоев В.А., Абиев З.А. Влияние скорости детонации взрывчатых веществ на степень предразрушения горной породы при взрыве. *Горные науки и технологии*. 2024;9(2):85–96. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>
Khokhlov S.V., Vinogradov Yu.I., Makkoiev V.A., Abiyev Z.A. Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock prefracturing during blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):85–96. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>
4. Koteleva N., Kuznetsov V., Vasilyeva N. A simulator for educating the digital technologies skills in industry. part one. dynamic simulation of technological processes. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10885. <https://doi.org/10.3390/app112210885>
5. Котелева Н.И., Вальнев В.В., Марков В.В. Программный сервис для контроля качества выполнения сборочных работ. *Цветные металлы*. 2025;(9):68–76. <https://doi.org/10.17580/tsm.2025.09.07>
Koteleva N.I., Valnev V.V., Markov V.V. Software service for quality control of assembly works. *Tsvetnye Metally*. 2025;(9):68–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2025.09.07>
6. Нгуен Нгок М., Фам Дык Т. Направление развития технологий добычи применительно к рудникам глубокого заложения. *Горные науки и технологии*. 2019;4(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-1-16-22>
Nguyen N., Pham D. Tendencies of Mining Technology Development in Relation to Deep Mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2019;4(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-1-16-22>
7. Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):74–83. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Panteleev A.V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr mine on January 9, 2018. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):74–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
8. Gell E.M., Walley S.M., Braithwaite C.H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52(9):2949–2961. <https://doi.org/10.1007/S00603-019-01787-8>
9. Покровский Г.И., Федоров И.С. *Действие удара и взрыва в деформируемых средах*. М.: Промстройиздат; 1957. 276 с.
10. Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Kunshin A.A., Kovalev D.A. Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling. *Applied Sciences*. 2021;11(16):7517. <https://doi.org/10.3390/app11167517>
11. Зыков В.С., Иванов В.В., Соболев В.В. Исследования влияния массовых промышленных взрывов на устойчивость подземных горных выработок при открыто-подземной разработке угольных месторождений. *Безопасность труда в промышленности*. 2018;(11):19–28.
Zykov V.S., Ivanov V.V., Sobolev V.V. Studies of the effect of massive industrial explosions on the stability of the underground mining workings at the open-pit and underground mining of coal deposits. *Occupational Safety in Industry*. 2018;(11):19–28. (In Russ.)
12. Yang L.-Y., Ding C.-X. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;107:150–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2018.04.039>
13. Zhukovskiy Yu.L., Korolev N.A., Babanova I.S., Boikov A.V. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;87(3):032056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032056>
14. Beloglazov I.I., Petrov P.A., Bazhin V.Yu. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. *Eurasian Mining*. 2020;(2):50–54. <https://doi.org/10.17580/em.2020.02.12>
15. Татаринов В.Н., Гупало В.С., Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Камаев А.А. Трёхмерное моделирование напряженно-деформированного состояния и анализ стабильности породного массива при строительстве подземной исследовательской лаборатории. *Записки Горного института*. 2026;278:3–15. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16631> (дата обращения: 28.03.2026).
Tatarinov V.N., Gupalo V.S., Akmatov D.Z., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Losev I.V., Kamaev A.A. Three-dimensional modeling of stress-strain state and rock massif stability analysis during the construction of an underground research laboratory. *Journal of Mining Institute*. 2026;278:3–15. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16631> (accessed: 28.03.2026).



16. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В., Косухин Н.И. Управление фактором геодинамической безопасности для обеспечения устойчивого развития АО «СУБР». *Горный журнал*. 2021;(1):81–85. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.14>
Sidorov D.V., Ponomarenko T.V., Kosukhin N.I. Geodynamic safety management toward sustainable development of Severouralsk Bauxite Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):81–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.14>
17. Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит». *Записки Горного института*. 2023;262:571–580. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9>
Gospodarikov A.P., Revlin I.E., Morozov K.V. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorskoye deposit of AO Apatit. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:571–580. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.9>
18. Shevkun E., Leshchinsky A., Plotnikov A. Special aspects of explosive loosening with minimal rock displacement. *E3S Web of Conferences*. 2020;192:01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201003>
19. Fu X., Sheng Q., Zhang Y., Chen J. Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015;80:155–170. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.017>
20. Алимжанов А.М. Модель неоднородного упругопластически деформируемого массива горных пород с подземной выработкой. *Механика и технологии*. 2014;(1):6–12.
Alimzhanov A.M. Model of the inhomogeneous elastic-plastic deformable rock massif which contained underground working. *Mechanics & Technologies*. 2014;(1):6–12. (In Russ.)
21. Немчин Н.П., Ветров С.В. Решение задачи горного давления с нелинейной функцией разупрочнения методом конечных разностей. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015;(2):49–58.
Nemchin N.P., Vetrov S.V. Solving the task of rock pressure with a non-linear function of softening using the finite difference method. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2015;(2):49–58. (In Russ.)
22. Холодилов А.Н., Господариков А.П. Модель расчета сейсмических колебаний, возникающих при массовых взрывах на подземных рудниках. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020;(1):33–40. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200104>
Kholodilov A.N., Gospodarikov A.P. Modeling seismic vibrations under massive blasting in underground mines. *Journal of Mining Science*. 2020;56(1):29–35. <https://doi.org/10.1134/S1062739120016454>
23. Козырев А.А., Панин В.И., Федотова Ю.В. Проблемы безопасности при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород. *Записки Горного института*. 2012;198:150–156. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5933> (дата обращения: 27.03.2026).
Kozyrev A.A., Panin V.I., Fedotova Y.V. Safety problems of mining operations in high-stress hard rock massif. *Journal of Mining Institute*. 2012;198:150–156. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5933> (accessed: 27.03.2026).
24. Маринин М.А., Евграфов М.В., Должиков В.В. Производство взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции «mine-to-mill»: современное состояние и перспективы. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(7):65–74. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3264>
Marinin M.A., Evgrafov M.V., Dolzhikov V.V. Production of blasting operations for a given granulometric composition of ore within the framework of the “mine-to-mill” concept: current state and prospects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(7):65–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3264>
25. Kuzmin Yu.O. Recent geodynamics of a fault system. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2015;51(4):480–485. <https://doi.org/10.1134/S1069351315040059>
26. Kuritsyn S.Yu., Rasulov K.M. On a generalized Riemann problem for metaanalytic functions of the second type. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2018;39(1):97–103. <https://doi.org/10.1134/S1995080218010183>
27. Петраков Д.Г., Купавых К.С., Купавых А.С. Экспериментальное исследование упруго-пластичных свойств пород нефтяного пласта с учетом насыщенности. *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2020;(3):33–38. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3\(327\)-33-38](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3(327)-33-38)
Petrakov D.G., Kupavykh K.S., Kupavykh A.S. Experimental study of elastic-plastic properties of oil reservoir rocks with account of saturation. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2020;(3):33–38. (In Russ.) [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3\(327\)-33-38](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3(327)-33-38)
28. Марысюк В.П., Корнейчук В.И., Фендер С.Н., Андреев А.А., Корецкий А.С. Совершенствование способов разгрузки массива скважинами большого диаметра при отработке сульфидных руд. *Горный журнал*. 2014;(4):15–18. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1298/article/22116/> (дата обращения: 27.03.2026).
Marysyuk V.P., Korneichuk V.I., Fender S.N., Andreev A.A., Koretsky A.S. Improvement of rock mass destressing by large diameter holes in sulfide-ore mining. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(4):15–18. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1298/article/22116/> (accessed: 27.03.2026).
29. Robinson P.R., Hsu C.S. Introduction to petroleum technology. In: Hsu C.S., Robinson P.R. (eds) *Springer Handbook of Petroleum Technology*. Cham: Springer; 2017, pp. 1–83. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49347-3_1



30. Жабин А.Б., Аверин Е.А., Поляков А.В. Показатель эквивалентной прочности горных пород. *Горная промышленность*. 2018;(5)112–115. Режим доступа: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/14132-pokazatel-ekvivalentnoj-prochnosti-gornyx-porod> (дата обращения: 27.03.2026).
Zhabin A.B., Averin E.A., Polyakov A.V. Rock strength equivalent index. *Russian Mining Industry*. 2018;(5)112–115. (In Russ.) Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/14132-pokazatel-ekvivalentnoj-prochnosti-gornyx-porod> (accessed: 27.03.2026).
31. Ермолович Е.А., Овчинников А.В., Аникеев А.А., Хаустов В.В. Влияние размеров образца на прочность мела. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(2):263–271.
Ermolovich E.A., Ovchinnikov A.V., Anikeev A.A., Khaustov V.V. Influence of sample dimensions on chalk strength. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(2):263–271. (In Russ.)
32. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., Мажитов А.М. Энергетические критерии квазихрупкого разрушения горных пород в технологических процессах их добычи и первичной переработки. *Горная промышленность*. 2022;(2):84–89. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-84-89>
Pershin G.D., Pshenichnaya E.G., Mazhitov A.M. Energy criteria for quasi-brittle fracture of rocks in technological processes of mining and primary processing. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):84–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-84-89>
33. Wu Y., Yin T., Zhuang D., Li Q., Chen Y. Research on the effect of thermal treatment on the crack resistance curve of marble using notched semi-circular bend specimen. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022;119:103344. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103344>
34. Yuan S., Sun Q., Li P., Geng J., Zhang H. Fracture properties and dynamic failure of three-point bending of yellow sandstone after subjected to high-temperature conditions. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022;265:108366. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108366>
35. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Шевнина Е.В., Кирсанов А.К., Костылев С.С. Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(1):14–24. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-14-24>
Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Shevnina E.V., Kirsanov A.K., Kostylev S.S. Granulometric composition predicting models after explosion in open-pit mining. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):14–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-14-24>
36. Zhang Z.-X., Sanchidrián J.A., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing: A review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023;56(1):747–778. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03068-3>

Информация об авторах

Молдован Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2227-6625>; e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru

Ястребова Карина Намидиновна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород научного центра геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Чернобай Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-6858-8854>

Information about the authors

Dmitriy V. Moldovan – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Blasting Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2227-6625>; e-mail: Moldovan_DV@pers.spmi.ru

Karina N. Yastrebova – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Laboratory of Physical-Mechanical Properties and Rock Destruction, Scientific Center of Geomechanics and Mining Production Problems, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Vladimir I. Chernobai – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Blasting Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6858-8854>

Article info

Received: 20.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 18.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 18.08.2026