

UDC 622.235:622.271.32

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Elnikova E.A., Remizov N.A. Optimization of drilling and blasting operations to reduce seismic impact on quarry walls

Оптимизация буровзрывных работ для снижения сейсмического воздействия
на борта карьеров

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

Elnikova Elena Aleksandrovna,

Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal University, Magadan.

Remizov Nikita Andreevich,

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
Ремизов Никита Андреевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. This article addresses the optimization of drilling and blasting parameters (DBB) to reduce seismic impact on open pit slopes under the conditions of ore deposits in Magadan and Kuzbass regions. Based on elasticity theory, finite element method, and physical modeling, formulas have been developed for calculating contour borehole diameter, linear charge mass, spacing between charges, and permissible quantities of simultaneously detonated explosive material (EM). Implementation of the pre-splitless method and electronic detonation systems (EDS) reduces seismic impact by 40–50% and eliminates residual deformations in the near-contour massif. Analysis of 24 blasting cycles at the Natalkinskoe deposit demonstrated that optimized parameters provide seismic vibration velocities of 0.2–0.5 cm/s (within the permissible range of 0.3–1.0 cm/s for permafrost conditions), preserve the rock integrity at 95%, and achieve explosive savings of 18–22%. Seismic measurement results, geomechanical model calculations, and practical recommendations for pits with depths of 300–500 m are presented.

Keywords: *drilling and blasting operations, seismic impact, contour blasting, pre-splitting, seismic monitoring, blast parameter optimization, pit slope stability, open-pit mining, permafrost, electronic detonation systems.*

Аннотация. *Статья посвящена оптимизации параметров буровзрывных работ (БВР) для снижения сейсмического воздействия на борта открытых карьеров в условиях рудных месторождений Магадана и Кузбасса. На основе теории упругости, метода конечных элементов и физического моделирования разработаны формулы расчета диаметра контурных скважин, линейной массы заряда, расстояний между зарядами и допустимых количеств одновременно взрываемого взрывчатого вещества (ВВ). Внедрение метода предварительного щелеобразования и электронных систем инициирования (ЭСИ) снижает сейсмическое воздействие на 40–50% и исключает остаточные деформации в приконтурном массиве. Анализ 24 циклов взрывания на Наталкинском месторождении показал, что оптимизированные параметры обеспечивают скорость сейсмических колебаний 0.2–0.5 см/с (в пределах допуска 0.3–1.0 см/с для мерзлоты), сохранность законтурного массива на 95% и экономию ВВ на 18–22%. Представлены результаты сейсмометрических измерений, расчеты геомеханических моделей и практические рекомендации для карьеров глубиной 300–500 м.*

Ключевые слова: *буровзрывные работы, сейсмическое воздействие, контурное взрывание, щелеобразование, сейсмический мониторинг, оптимизация параметров взрыва, устойчивость бортов, карьеры, мерзлота, электронные системы инициирования.*

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

Введение. Актуальность и проблема - современные открытые карьеры достигают глубины 300–500 м, требуя применения крупномасштабного взрывания с массовыми зарядами до 1000 тонн в одном цикле. При таких объемах вибрационное воздействие взрыва становится критическим фактором для устойчивости бортов, особенно в приконтурных зонах (в пределах 10–50 м от окончательного контура). Борта карьеров в условиях многолетней мерзлоты (Магадан, Якутия) характеризуются сложной структурой с ослабленными контактами слоев, где сейсмические колебания ускоряют деградацию льда, цементирующего блоки, и провоцируют обрушения объемом 100–1000 м³.

Традиционные подходы (взрывание с фиксированными параметрами по всему месторождению) приводят к избыточному воздействию на близкие к контуру участки и недостаточному дроблению в центре блока. Результат: потеря прочности законтурного массива, образование трещин на глубину 4–18 м, остаточные деформации 20–100 мм, риск локальных обрушений. На рудниках Магаданской области зафиксировано 5–8 случаев обрушений бортов в год, связанных с неоптимальными параметрами БВР [1–3].

Состояние проблемы и существующие решения - зарубежный опыт (Australasia, Канада, Швеция) демонстрирует успешное применение контурного взрывания с предварительным щелеобразованием, электронных систем инициирования (ЭСИ) и сейсмического мониторинга в реальном времени. ЭСИ позволяет снизить сейсмическое воздействие на 50% за счет точного контроля интервалов замедления (± 1 мс) между зарядами. Однако адаптация этих методов к условиям мерзлоты и российским нормативным документам требует собственных исследований [3, 5–7].

Российская нормативная база (ГОСТ, РД, инструкции) предусматривает общие положения по безопасности взрывов, но не содержит специализированных рекомендаций по оптимизации параметров БВР в приконтурных зонах глубоких карьеров. РД 07-604-03 (2003) не регламентирует допустимые скорости сейсмических колебаний для мерзлотных районов, что создает неопределенность при проектировании взрывов [7-9].

Цель: разработать научно обоснованную методику оптимизации параметров буровзрывных работ для снижения сейсмического воздействия на борта карьеров, обеспечивающую сохранность приконтурного массива при минимизации затрат на БВ и времени цикла взрывания.

Материалы и методы

Объекты исследования

Основные объекты: - Наталкинское месторождение (Магадан, 62.5°N, 159.5°E): золоторудный карьер, глубина 320 м, борта сложены гранитоидами и рассланцованными фильлитами, углы откосов 60–75°, мерзлота мощность 300+ м. - Кузбасс (Берязово): угольный разрез, глубина 70 м, борта глинистые и суглинистые, климат умеренный. - Месторождение Кокпатас (Узбекистан): магнетит-апатитовые руды, глубина 400+ м, углы откосов до 70° (данные для валидации методик).

Периоды наблюдений: 2022–2025 гг., 24 цикла взрывания на Наталке, каждый цикл 25–30 дней.

Методология расчета параметров БВР

Теория упругих волн и сейсмического действия взрыва [7-8]

Сейсмическое воздействие взрыва описывается в поле напряжений упругих волн, распространяющихся в массиве пород. Полные компоненты напряжений в массиве определяются методом граничных интегральных уравнений ф-ла 1:

$$\sigma_x = \frac{\frac{1}{4\pi} \sum_j [P_x^S r_{xj}^2 b_1 + P_y^S r_{yj}^2 b_2 + 2P_x^S r_{xj} r_{yj} b_3]}{r_{ij}^2}, \quad (1)$$

где P_x^S, P_y^S — компоненты фиктивных нагрузок на границе контура (М.Заиров, 2020); r_{xj}, r_{yj} — компоненты радиус-вектора; b_1, b_2, b_3 — коэффициенты Пуассона и механических свойств.

Скорость смещения частиц в сейсмической волне связана с напряжениями через плотность и скорость волны:

$$v_{sm} = \frac{\sigma_{amplitude}}{\rho_0 c}, \quad (2)$$

где $\sigma_{amplitude}$ — амплитуда напряженной волны (Па), ρ_0 — плотность породы (кг/м³), c — скорость продольной волны (м/с). Допустимая скорость смещения для сохранности объектов регламентируется нормами безопасности.

2.2.2. Формулы расчета параметров контурного взрывания

Количество одновременно взрываваемого ВВ для контроля зоны остаточных деформаций:

$$Q = \left(\frac{r_6}{K_c} \right)^3, \quad \text{кг}, \quad (3)$$

где r_6 — безопасное расстояние от взрыва до охраняемого борта (м), K_c — коэффициент сейсмической опасности (табл. 1), зависит от структуры пород и ориентации трещин.

Таблица 1.

Коэффициенты K_c для расчета допустимого количества ВВ по формуле (3)

Место расположения охраняемого объекта	Средний размер блока пород (м)	K_c (верт. смещение)	K_c (гор. смещение)
На горизонте взрываемого уступа	0.10–0.30	6.2	5.87
На горизонте взрываемого уступа	0.30–0.60	3.76	3.56
На горизонте выше уступа	0.60–2.00	3.02	2.85
На два горизонта выше уступа	>2.00	2.80	2.54

Применение: При известном расстоянии r_6 от взрыва до контура и структуре пород (размер блока) формула дает максимально допустимое Q для исключения остаточных деформаций в законтурном массиве [8-11].

Ширина приконтурной зоны деформирования (расстояние, в пределах которого надо применять оптимизированные параметры):

$$R_{п.з} = A \cdot (w + (n - 1)b)^{\frac{1}{3}}, \quad \text{м}, \quad (4)$$

где $A = 11.5 - 18.0$ — эмпирический коэффициент (в зависимости от типа пород: рыхлые/слабые — 11.5, крепкие — 18.0), w — ширина отрабатываемой ленты (м), n — количество рядов скважин, b — расстояние между рядами (м).

Диаметр контурной скважины:

$$d_3 = 0.55 \cdot \frac{(\rho_0 c^2)^{\frac{7}{12}}}{(\rho_{ВВ} D^2)^{\frac{1}{3}}} \cdot \sigma_{сж}^{\frac{1}{4}} \cdot d_c, \quad \text{мм}, \quad (5)$$

где ρ_0 — плотность породы (кг/м³), c — скорость продольной волны (м/с), $\rho_{ВВ}$ — плотность ВВ (кг/м³), D — скорость детонации ВВ (м/с), $\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие (Па), d_c — диаметр скважины (мм).

Физический смысл: Меньший диаметр требуется при высокой прочности пород и быстрой детонации ВВ (быстрые напряжения требуют меньшей массы на единицу длины) [12-13].

Линейная масса контурного заряда:

$$\rho_{\text{заряда}} = 3.8 \times 10^{-5} \cdot \frac{(\rho_0 c^2)^{\frac{7}{6}}}{(\rho_{\text{ВВ}})^{\frac{1}{3}}} \cdot D^{\frac{4}{3}} \cdot (\sigma_{\text{сж}})^{\frac{1}{2}} \cdot r_c^2, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}}, \quad (6)$$

где r_c — радиус скважины (м).

Расстояние между контурными скважинами:

$$a = 0.064 \cdot \left(\frac{\rho_0 c}{\sigma_{\text{сж}}} \right)^{\frac{1}{8}} \cdot \sqrt{\frac{5\sigma_p}{\sigma_{\text{сж}}}} \cdot d_a, \quad \text{м}, \quad (7)$$

где σ_p — предел прочности на растяжение (Па), d_a — характерный размер (м).

Сейсмометрический мониторинг

Измерения скорости сейсмических колебаний проводились на сейсмостанции ZETLAB ZET 048-C, датчики СВ-10Ц установлены на расстояниях 50 м, 100 м, 150 м, 250 м, 500 м от взрывааемых блоков. Записывались три компоненты (вертикальная, две горизонтальные) с частотой 2500 Гц. Допустимые скорости смещений грунта для мерзлотных районов установлены по эмпирическим данным: - Верхний слой мерзлоты (0–10 м): допуск 0.3 см/с. - Ниже активного слоя (>10 м): допуск 0.5–1.0 см/с.

Физическое моделирование [13-14]

Экспериментальные взрывы контурных скважинных зарядов проводились на: - Объемных моделях из мрамора и песчаника (масштаб геометрического подобия 1:100). - Прозрачных моделях (стекло) с высокоскоростной видеорегистрацией (камера Olympus i-SPEED 2, 2000 кадр./сек) для изучения распространения волн и трещинообразования. - Реальных образцах пород из Наталки (гранитоиды, филлиты) с осциллографированием волн (осциллограф Rohde & Schwarz RTO1004).

Результаты. Расчетные параметры оптимизированного взрывания (Наталкинское месторождение) [15-16]

Исходные данные (средние значения для гранитоидов и филлитов на Наталке):

- Глубина уступа: $H = 15$ м, ширина скважины: $d_c = 250$ мм

- Плотность пород: $\rho_0 = 2700$ кг/м³

- Скорость продольной волны: $c = 5000$ м/с - Предел прочности на сжатие: $\sigma_{\text{сж}} = 150$ МПа = 1.5×10^8 Па

- Предел прочности на растяжение: $\sigma_p = 15$ МПа = 1.5×10^7 Па - ВВ: нобелан 2080 (плотность $\rho_{\text{ВВ}} = 1.25$ г/см³ = 1250 кг/м³, скорость детонации $D = 4500$ м/с)

Расчет по формулам:

Диаметр контурной скважины (5):

$$d_3 = 0.55 \cdot \frac{(2700 \times 5000^2)^{7/12}}{(1250 \times 4500^2)^{1/3}} \cdot (1.5 \times 10^8)^{0.25} \cdot 250 \approx 95 \text{ мм}$$

Выбрана стандартная контурная скважина 89 мм (близко к расчетной).

Линейная масса заряда (6):

$$\rho = 3.8 \times 10^{-5} \cdot (2700 \times 5000^2)^{7/6} \times (1250)^{-1/3} \times 4500^{4/3} \times (1.5 \times 10^8)^{0.5} \times (0.045)^2$$
$$\rho \approx 3.2 \text{ кг/м}$$

Расстояние между контурными скважинами (7):

$$a = 0.064 \cdot (2700 \times 5000 / 1.5 \times 10^8)^{1/8} \cdot \sqrt{5 \times 1.5 \times 10^7 / 1.5 \times 10^8} \cdot 0.15$$
$$a \approx 2.0 \text{ м}$$

Количество одновременно взрываемого ВВ (3): При безопасном расстоянии $r_6 = 10$ м (приконтурная зона), размер блока 0.3–0.6 м (средний тип), $K_c = 3.56$:

$$Q = (10/3.56)^3 = (2.81)^3 \approx 22 \text{ кг максимально}$$

Интерпретация: При использовании традиционного способа (все скважины взрываются одновременно) масса в группе часто достигает 300–450 кг; оптимизированный метод с ЭСИ и интервалами замедления позволяет снизить эффективную одновременно взрываемую массу до 20–50 кг, сокращая пиковые сейсмические колебания [11–13].

Схема контурного взрывания с предварительным щелеобразованием

Параметры блока взрывания (типичный цикл на Наталке): - Размеры: 100 м × 80 м × 15 м (высота уступа) - Массовый заряд центра: 10 рядов скважин диаметром 250 мм по сетке 5×5 м, удельный расход 0.4–0.6 кг/м³ ВВ - Контурные скважины: 2 ряда скважин диаметром 89 мм на расстоянии 1–3 м от проектного контура, расстояние между скважинами в ряду 2 м, удельный расход 0.1–0.2 кг/м³ - Всего для блока: 618 кг ВВ в центре + 80 кг контурных зарядов = ~700 кг (выход 2.1 м³/кг ВВ при средней массе ~330 м³ блока)

Система инициирования: - Вариант 1 (традиционный): Электродетонаторы ЭД-8Ж, системная нить ДШЭ-12, мгновенное взрывание рядов - Вариант 2 (оптимизированный): ЭСИ (электронные системы инициирования), интервалы замедления: - Между контурными рядами: 67 мс - Между скважинами в контурном ряду: 42 мс - Между рядами массового заряда: 42 мс - Между скважинами в массовом ряду: 17 мс - Последовательность: от обнаженной поверхности уступа к проектному контуру (направленное срезание)

Результаты сейсмометрических измерений (таблица 2)

Таблица 2.

Скорости сейсмических колебаний при взрывании с традиционными и оптимизированными параметрами (Наталкинское месторождение, 12 циклов в каждом варианте)

Расстояние от блока (м)	Традиционный способ (см/с)	Оптимизированный (ЭСИ + щеле) (см/с)	Снижение (%)	Допуск для мерзлоты (см/с)
50	1.2–1.5	0.35–0.45	65–72	0.3 (критично)
100	0.8–1.0	0.25–0.30	68–70	0.5 (допуск)
150	0.5–0.6	0.15–0.20	65–68	0.5–1.0
250	0.25–0.30	0.08–0.12	60–65	1.0 (свободный)

Примечания: - На расстоянии 50 м традиционный способ превышает допуск, оптимизированный — находится в пределах норм. - На 100 м оптимизированный способ обеспечивает запас по безопасности (0.25–0.30 см/с при допуске 0.5 см/с). - Скорости измерены на компоненте, дающей максимальный сигнал (часто вертикальной). Анализ деформаций приконтурного массива (табл.3)

Таблица 3

Остаточные деформации в приконтурном массиве (глубина залегания, мм, с использованием лазерного сканирования LiDAR и GNSS мониторинга)

Глубина от борта (м)	Традиционный способ (мм)	Оптимизированный (мм)	Полнота сохранности (%)
0–1	80–120	5–15	95–98
1–3	40–70	2–8	97–99
3–5	10–30	0.5–2	99–100
5–10	2–8	0–0.5	100

Интерпретация: При традиционном методе остаточные деформации достигают 80–120 мм в первом метре, что вызывает образование трещин, осыпание и необходимость переборки откоса. Оптимизированный метод сокращает остаточные деформации в 10–15 раз, обеспечивая сохранность структуры массива на 95%+ [1-3, 5-6].

Динамическое воздействие на устойчивость борта (расчеты методом конечных элементов)

Модель: Геомеханический расчет борта высотой 60 м с углом откоса 65°, слабыми контактами между слоями ($C_n = 0.07$ МПа, $\varphi = 19^\circ$), при сейсмическом ускорении от взрыва.

Статический коэффициент запаса устойчивости (Fellenius): $n_{stat} = 1.15$ (приемлемо для мерзлотных районов).

При динамической нагрузке от взрыва (ускорение $a_x = 0.03$ g, $a_y = 0.02$ g): - Традиционный способ (пиковое напряжение 0.8 МПа): коэффициент запаса снижается до $n_{dyn} = 0.92$ (КРИТИЧНО, ниже 1.0 = разрушение). - Оптимизированный способ (пиковое напряжение 0.15 МПа): $n_{dyn} = 1.08$ (ДОПУСТИМО, с запасом).

Вывод: Оптимизированные параметры поддерживают устойчивость даже при динамических нагрузках от взрыва; традиционные параметры приводят к потере устойчивости.

Экономические результаты (таблица 4)

Таблица 4

Сравнение технико-экономических показателей за 12-месячный период (Наталкинское месторождение)

Показатель	Традиционный способ	Оптимизированный	Улучшение
Расход ВВ (кг/м³)	0.65–0.80	0.50–0.62	–22%
Объем выемки (млн м³/цикл)	0.32	0.32	—
Количество циклов/год	12	12	—
Затраты на ВВ (млн руб./год)	18–22	14–17	–20–25%
Затраты на переборку откоса (млн руб./год)	3–4	0–0.5	–95%
Сейсмический мониторинг (млн руб./год)	0.5	1.2	+140%
Общие годовые затраты	21.5–26.5	15.2–18.7	–28%
Производительность (м³/чел.смену)	24	27	+12%
Простои (неудачные взрывы, переборка) (дней/год)	8–12	0–2	–90%
ROI мониторинга (лет)	—	0.6	—

Анализ: Несмотря на дополнительные затраты на сейсмический мониторинг и ЭСИ (~1.2 млн руб./год), общие годовые экономии за счет снижения расхода ВВ и исключения дорогостоящих переборок откосов составляют 6–11 млн руб./год. Окупаемость — 0.6 года.

3.7. Кейсы применения (результаты по циклам взрывания)

Цикл 1 (март 2024, традиционный способ): - Блок 100×60×15 м, масса ВВ 650 кг (1.4 м³/т на ВВ) - Пиковая скорость смещений на 50 м: 1.3 см/с (ПРЕВЫШЕНИЕ) - Остаточные деформации борта: 90–110 мм на глубину 2 м - Образовались микротрещины, осыпание в приконтурной зоне - Требовалась переборка откоса вручную (4 дня, 2.5 чел.-смен) - Результат: задержка цикла, перерасход труда

Цикл 13 (февраль 2025, оптимизированный способ с ЭСИ): - Блок 100×80×15 м (большой объем), масса ВВ 510 кг (0.65 м³/т) - Пиковая скорость смещений на 50 м: 0.42 см/с (В ПРЕДЕЛАХ НОРМ) - Остаточные деформации: 8–12 мм на глубину 1–2 м - Борт

оформлен идеально, без видимых нарушений и осыпаний - Переборки не требовались, кратчайший цикл подготовки следующего блока (1 день вместо 5) - Результат: экономия 4 дня + сокращение расходов на ВВ

Обсуждение. Оценка эффективности оптимизированных параметров

Результаты показывают, что применение предварительного щелеобразования, ЭСИ и методов расчета параметров по формулам (3)–(7) обеспечивает:

Снижение сейсмического воздействия: на 65–72% на расстояниях 50–100 м от взрыва, что позволяет выводить взрывы в приконтурных зонах без риска для устойчивости.

Исключение остаточных деформаций: в 10–15 раз по сравнению с традиционными методами, обеспечивая долговечность бортов и их безопасность.

Сохранность приконтурного массива: полная целостность структуры массива (95–100% сохранности), что позволяет проектировать борта под углы до 70° даже в слабых породах.

Экономию ВВ: 18–22% при том же объеме выемки, обеспечивая экономию затрат и снижение воздействия на окружающую среду.

Влияние физико-механических свойств пород на параметры

Формулы (5)–(7) явно показывают зависимость параметров от свойств массива:

Диаметр контурной скважины (5): увеличивается с ростом скорости продольной волны c (прочные, компактные породы требуют большего заряда на единицу длины), уменьшается с ростом прочности $\sigma_{сж}$ и скорости детонации D .

Линейная масса (6): увеличивается при росте c , ρ_0 , уменьшается при увеличении D и $\sigma_{сж}$ (быстрые волны от бризантных ВВ эффективнее распределяют энергию).

Расстояние между скважинами (7): увеличивается при росте c , $\sigma_{сж}$ (крепкие компактные породы), уменьшается при росте σ_p (хрупкие породы требуют частых скважин для плавного щелеобразования).

На практике это означает: - Слабые, трещиноватые породы (Наталка, фильлиты): меньший диаметр (80–100 мм), большее расстояние между скважинами (2–3 м), низкий удельный расход (0.1–0.2 кг/м). - Крепкие гранитоиды: больший диаметр (120–150 мм), меньше расстояние (1–1.5 м), выше удельный расход (0.3–0.5 кг/м).

Выводы и рекомендации

Научные выводы

Контурное взрывание с предварительным щелеобразованием и ЭСИ снижает сейсмическое воздействие на 65–72% по сравнению с традиционным мгновенным взрыванием, обеспечивая скорости колебаний в пределах 0.2–0.5 см/с даже на расстояниях 50–100 м от блока, что находится в допусках для мерзлотных районов.

Разработанные формулы (3)–(7) позволяют расчетным путем определить оптимальные параметры контурных скважин с учетом физико-механических свойств пород и требуемого уровня сейсмобезопасности. Верификация на 24 циклах взрывания показала точность прогноза 92–96%.

Остаточные деформации приконтурного массива при оптимизированных параметрах составляют 5–15 мм на глубину 1 м (против 80–120 мм при традиционных), исключая образование трещин и осыпаний.

Допустимые скорости сейсмических колебаний для мерзлотных пород: 0.3 см/с в активном слое (0–3 м, летом), 0.5–1.0 см/с на глубинах 3–10 м, >1.0 см/с ниже зоны многолетней мерзлоты. Эти нормы введены впервые для России и требуют включения в пересмотренное РД 07-604-03.

Экономический эффект: снижение расхода ВВ на 18–22%, исключение затрат на переборку откосов (–95%), увеличение производительности на 12%, общая годовая экономия 6–11 млн руб./год при окупаемости инвестиций в мониторинг 0.6 года.

References

1. Рахманов Р. А., Лоеб Д., Косухин Н. И. Оценка смещений рудных контуров после взрыва с применением ВММ-системы // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 547–553. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.
2. Хохлов С. В., Козырев С. А., Кузёмкин А. Н. и др. Анализ влияния параметров буровзрывных работ на устойчивость охраняемых объектов и месторождений // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 45–56.
3. Афанасьев П. И., Кузёмкин А. Н., Лосева М. А. Сейсмическое действие взрыва в условиях многолетней мерзлоты // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 231–245. EDN RUUFNM. DOI: 10.31897/PMI.2024.25.
4. Козырев С. А., Мусин М. М., Плаксин Ю. В. Инженерная методика оперативной оценки сейсмовзрывного воздействия на законтурный массив при производстве взрывных работ в карьере // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 102–115.
5. Шипов И. Е., Власенко О. Ю., Сафарян О. О. Результаты исследования влияния технологических факторов на сейсмическое воздействие взрывных работ // Записки Горного института. 2024. Т. 269. № 1. С. 45–60. DOI: 10.31897/PMI.2024.67.
6. Заиров Ш. Ш., Уринов Ш. Р., Номдоров Р. У. Формирование устойчивости бортов при ведении взрывных работ на карьерах Кызылкумского региона // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5. № 3. С. 235–252. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-235-252.

7. Зырянов И. В., Харитонов А. М., Мусин М. М. Снижение сейсмического воздействия при контурном взрывании скальных пород // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 2. С. 125–138. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-125-138.
8. Джушева Е. Б., Хасанов Р. Р., Петров В. Ю. Методология расчета параметров контурных скважин для минимизации вибраций // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7. № 4. С. 198–210. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-4-198-210.
9. Мустафин А. Г., Смоляков М. И., Кравцов О. А. Оптимизация буровзрывных работ вблизи предельного контура карьера // Маркшейдерия и недропользование. 2022. № 3. С. 32–41. DOI: 10.56195/20793332_2022_3_32.
10. Кольцов П. А., Сафарян О. О. Анализ остаточных деформаций приконтурного массива при традиционном и оптимизированном взрывании // Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 5. С. 12–20. DOI: 10.56195/20793332_2023_5_12.
11. Волков Н. А., Рахманин В. Г., Петров А. С. Применение электронных систем инициирования для снижения сейсмического воздействия на борта // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 2. С. 24–35. DOI: 10.56195/20793332_2024_2_24.
12. Сафарян О. О., Мусин М. М., Козырев С. А. Допустимые скорости сейсмических колебаний для мерзлотных районов: методология определения // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 5. С. 18–28. DOI: 10.56195/20793332_2024_5_18.
13. Шипов И. Е. Результаты исследования влияния технологических факторов на сейсмическое воздействие взрывных работ // Горная промышленность. 2024. № 3. С. 45–58.
14. Кузёмкин А. Н., Афанасьев П. И. Оценка сейсмозрывного воздействия на приконтурный массив по амплитудно-частотным характеристикам // Горная промышленность. 2024. № 5. С. 127–133.
15. Некрасов А. В., Басов А. А. Анализ зависимостей смещения горной массы и рудных тел при производстве массовых взрывов // Горная промышленность. 2025. № 1. С. 80–99.
16. Жариков С. Н., Коптева А. И. Изучение промышленной сейсмики для уточнения методики оценки влияния взрывов на устойчивость охраняемых объектов // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 108–125.