

Повышение качества дробления горной массы при использовании радиоэлектронных детонаторов

Ю.А. Малинин¹ ✉, Н.Н. Гриб^{1, 2}

¹ Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Российская Федерация

² Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация
✉ alkor.05@mail.ru

Резюме: В статье рассмотрено влияние на качество дробления горной массы применения электронных детонаторов, принцип работы которых основан на использовании микропроцессоров для точного управления моментом взрыва. Электронные детонаторы демонстрируют повышенную точность и адаптивность по сравнению с традиционными системами. Внедрение электронных детонаторов в практику буровзрывных работ привело к ряду существенных преимуществ. Оно способствует снижению сейсмического воздействия промышленных взрывов на окружающую среду, уменьшению образования пыли и улучшению дробления горной массы. Более качественное дробление снижает затраты на последующие этапы обработки – погрузку, транспортировку и переработку, тем самым повышая общую экономическую эффективность. Для оценки качества дробления горной массы взрывами применялась система PortaMetrics, которая использует искусственный интеллект и стереоизображение для получения точных данных. PortaMetrics не требует настройки и может использоваться для проверки результатов буровзрывных работ. Объектом исследования выбрано Эльгинское каменноугольное месторождение с запасами каменного угля по стандартам JORS 2,2 млрд т угля. Плановые показатели на 2025 г. составили: по вскрыше – порядка 150 млн м³, по добыче – 32 млн т. При таких колоссальных объемах основной и начальной операцией являются буровзрывные работы. На месторождении был проведен эксперимент по оценке качества дробления горной массы в зависимости от применяемого способа инициирования. По результатам эксперимента установлено, что при короткозамедленном взрывании выход негабаритов составил 15,4%. Применение электронных детонаторов позволило снизить выход негабарита до 2% и менее.

Ключевые слова: буровзрывные работы, средства инициирования, электронный детонатор, качество дробления горной массы

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №24-17-20031).

Для цитирования: Малинин Ю.А., Гриб Н.Н. Повышение качества дробления горной массы при использовании радиоэлектронных детонаторов. *Горная промышленность*. 2026;(4):123–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-123-128>

Improving rock fragmentation quality using electronic detonators

Yu.A. Malinin¹ ✉, N.N. Grib^{1, 2}

¹ Nerungri Technical Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Nerungri, Russian Federation

² Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation
✉ alkor.05@mail.ru

Abstract: In this study we investigate the use of electronic detonators for improving the quality of rock mass fragmentation. The operating principle of electronic detonators is based on the microprocessor control, which enables precise timing of detonation. In comparison with the conventional systems, such electronic detonators demonstrate superior accuracy and adaptability. Introduction of electronic detonators into the drilling and blasting practice offers a number of advantages by reducing the seismic impact of industrial blasting on the environment, decreasing the amount of dust generation, and improving fragmentation of the rock mass. In turn, higher-quality fragmentation reduces costs at subsequent stages of the production cycle, including loading, transportation, and processing, thereby enhancing the overall economic efficiency. The fragmentation quality was assessed using the PortaMetrics system that employs AI and stereo imaging to obtain accurate measurements. PortaMetrics requires no prior calibration and can be used to verify the outcomes of the drilling and blasting operations.

The Elga coal deposit with the coal reserves of 2.2 billion tonnes by the JORC standards was investigated. The production indicators for 2025 were estimated at 150 million cubic meters of overburden material and 32 million tonnes of commercial coal. At such large production volumes, drilling and blasting operations constitute the primary and initial stage of the mining cycle. An in-situ experiment was conducted at the deposit to evaluate the quality of rock mass fragmentation depending on the initiation method. Short-delay blasting demonstrated the yield of oversized fragments at the level of 15.4%. The use of electronic detonators reduced the proportion of oversize material to 2% or less.

Keywords: drilling and blasting operations, initiation systems, electronic detonators, rock mass fragmentation quality

Acknowledgements: This work was supported by a grant of the Russian Science Foundation (project No.24-17-20031).

For citation: Malinin Yu.A., Grib N.N. Improving rock fragmentation quality using electronic detonators. *Russian Mining Industry*. 2026;(4):123–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-123-128>

Введение

Разработка месторождения полезных ископаемых – это комплексная задача, направленная не только на уменьшение издержек производства, но и на повышение эффективности работы горнотранспортного комплекса. В современном мире применяются различные подходы для того, чтобы достичь минимальной себестоимости добычи полезных ископаемых. В горнодобывающей промышленности, особенно при разработке месторождений открытым способом, буровзрывные работы (БВР) являются неотъемлемой частью технологического цикла. Эффективность и безопасность БВР во многом зависят от применяемой системы инициирования взрыва. Системы инициирования взрывов при БВР представляют собой комплекс технических средств и организационных мероприятий, предназначенных для надежного и своевременного подрыва зарядов взрывчатых веществ в заранее определенной последовательности [1].

Основными компонентами системы инициирования являются: детонаторы (электрические, неэлектрические, электронные), соединительные провода или волноводы, взрывные машинки (источники тока или импульса), а также средства контроля и диагностики. Выбор конкретной системы инициирования определяется множеством факторов, включая физико-механические свойства горных пород, требуемую степень дробления, допустимый уровень сейсмического воздействия, климатические условия и экономическую целесообразность. Преимущества и недостатки применения тех или иных систем инициирования были рассмотрены авторами статей [2; 3].

Современные системы инициирования блоков БВР стремятся к обеспечению максимальной точности временных интервалов между взрывами отдельных зарядов, что позволяет оптимизировать процесс дробления горной массы, снизить уровень вибрации и шума, повысить безопасность работ и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. В последние годы все большее распространение получают электронные системы инициирования, обладающие высокой точностью и надежностью, а также возможностью программирования сложных схем взрывания.

Для объективной оценки качества дробления используются различные системы и методы. Традиционные методы включают визуальный осмотр и ситовой анализ. Визуальный осмотр позволяет оперативно оценить общее качество дробления, однако он субъективен и не дает количественных данных. Ситовой анализ, заключающийся в просеива-

нии образцов через сита с различными размерами ячеек, предоставляет более точную информацию о гранулометрическом составе.

Современные системы оценки качества дробления все чаще используют автоматизированные методы, такие как фотоанализ и лазерное сканирование. Фотоанализ, основанный на обработке изображений горной массы, позволяет определять размер и форму частиц. Лазерное сканирование создает трехмерную модель горной массы, что позволяет анализировать ее структуру и распределение частиц. Применение беспилотных авиационных систем (БПЛА) активно интегрируется в процессы анализа гранулометрического состава, и это обусловлено рядом значительных преимуществ. Важным фактором является исключение необходимости присутствия человека в потенциально опасных зонах проведения работ. Кроме того, воздушная съемка, выполняемая с помощью БПЛА, позволяет получать изображения с труднодоступных точек обзора, которые могли бы быть упущены при наземной съемке. В связи с этим ряд программных решений расширили функционал и теперь могут использоваться в связке с БПЛА для обработки данных, полученных в ходе аэрофотосъемки. Существуют следующие системы анализа грансостава: ГИС Геомикс Granulometric (Грансостав), Wip Frag, PowerSieve,

На рынке представлено значительное количество коммерческих решений в форме специализированных программных средств для анализа фрагментации, разработанных в разных странах: Tuscips (Германия), Iprac и Kth (Швеция), Fragscan (Франция), Wipfrag (Канада), Split и Cias (США), Power Sieve (Австралия), Fragalyst 3.0 (Индия) [4]. В России Институтом проблем и комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН) была разработана программа «Грансостав 2008», представляющая собой программу обработки снимков, полученных при фотографировании развала горной породы с применением сигнальных лент с заранее измеренными длинами сторон для дальнейшего масштабирования снимка [5].

Выбор конкретной системы оценки качества дробления зависит от различных факторов, включая тип горной породы, требуемую точность и доступный бюджет. Комплексный подход, сочетающий традиционные и современные методы, обеспечивает наиболее полную и объективную оценку качества дробления. Постоянный мониторинг и анализ данных позволяют оптимизировать процессы дробления и повысить эффективность горнодобывающего производства.

В работе Б.Р. Ракишева предложен теоретический подход к определению гранулометрического состава взорванных горных пород [6]. Это аналитический метод определения каждого класса пород по крупности во взорванной горной массе.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования по оценке эффективности применения электронных детонаторов (ЭД) при проведении буровзрывных работ выполнены на Эльгинском каменноугольном месторождении. Оценка качества дробимости горной массы выполнена с помощью системы PortaMetrics. Это аппаратно-программный комплекс, разработанный в канадской корпорации Weir Motion Metrics¹.

Эльгинское месторождение, расположенное в юго-восточной части Якутии, является одним из крупнейших в мире месторождений коксующегося угля. Освоение этого уникального объекта сопряжено с рядом сложных горно-геологических условий, определяющих выбор технологий добычи и обеспечение безопасности горных работ.

Ключевыми факторами, влияющими на горно-геологические условия, являются сложное геологическое строение месторождения, включающее наклонное залегание угольных пластов, многочисленные тектонические нарушения и наличие водоносных горизонтов. Угольные пласты характеризуются переменной мощностью и зольностью, что требует применения селективной выемки и обогащения угля.

Гидрогеологические условия осложняются наличием многолетней мерзлоты, которая оказывает значительное влияние на устойчивость горных пород и приток подземных вод. При оттаивании мерзлых пород происходит снижение их прочности и деформация земной поверхности, что создает риск обрушений и оползней.

В настоящее время на месторождении работает более 70 буровых станков различной производительности. Проектирование взрывных блоков – многогранный процесс, который должен учитывать изменчивость физико-механических свойств пород, удаленность промышленной инфраструктуры и необходимое качество дробления.

Цель исследований – оптимизация параметров взрыва для достижения требуемой степени дробления горной массы при минимальных затратах и воздействии на окружающую среду.

Первым этапом является детальное геологическое изучение массива горных пород, включающее определение физико-механических свойств, трещиноватости, слоистости и наличия тектонических нарушений. Эта информация служит основой для определения удельного расхода взрывчатых веществ (ВВ) и схемы расположения скважин.

Технологические параметры, такие как тип горного оборудования, производительность и требования к фракционному составу дробленной массы, также оказывают существенное влияние на проект взрывного блока. Необходимо учитывать возможности погрузочно-транспортного оборудования и требования технологических процессов обогащения полезных ископаемых.

Выбор типа ВВ определяется исходя из горно-геологических условий, требуемой степени дробления и экономи-

ческой целесообразности. Наиболее распространенными являются гранулированные и эмульсионные ВВ, обладающие различными характеристиками по скорости детонации, бризантности и чувствительности к детонации. При больших объемах разрушения структурные особенности скальных массивов, свойства и характеристики применяемых ВВ и средств инициирования скважинных зарядов существенно влияют на эффективность буровзрывного комплекса [7; 8].

Схема расположения скважин, включающая расстояние между скважинами, линию сопротивления по подошве и глубину скважин, определяет характер дробления горной массы. Важным фактором является применение короткозамедленного взрывания, позволяющего снизить сейсмическое воздействие и улучшить дробление за счет наложения волн детонации, но из-за отклонений фактических интервалов замедлений в элементах поверхностных систем (детонаторах-замедлителях) и, особенно, в скважинных детонаторах желаемый эффект не всегда достигается.

Электронные детонаторы можно запрограммировать с шагом задержки в 1 мс, практически без разброса, что обеспечивает точное время срабатывания при взрывных работах [9; 10].

Исследование проводилось по 10 блокам БВР и было направлено на анализ качества дробления горной массы в зависимости от применяемого способа инициирования. Основным применяемый метод – натурное наблюдение развала горной массы и её оценка.

Взрываемые блоки были сложены алевролитами, крупно-, средне-, мелкозернистыми песчаниками и конгломератами с крепостью 7–15 по шкале М.М. Протоdjаконова и II–III категорией пород по трещиноватости.

При оценке качества дробления взрывов применялась система PortaMetrics, которая использует искусственный интеллект и стереоизображение для получения точных данных. PortaMetrics не требует настройки и может использоваться для проверки результатов буровзрывных работ или в случае отсутствия стационарных систем анализа гранулометрического состава².

Обсуждение результатов

Опытные блоки: 1-1 и 1-2

Экспериментальные взрывы проводились на одном горизонте, в равных горно-геологических условиях. После проведения взрывов была выполнена их оценка. Согласно оценке взорванных блоков стандартным методом выход негабаритов составил 15,4%. Качество дробления представлено на рис. 1. Анализ даёт информацию о количестве фракции в процентах в зависимости от размера куска.

При применении электронных детонаторов выход негабарита составил менее 2% (рис. 2).

Опытные блоки: 2-1 и 2-2

Иницирование блока БВР №2-1 стандартным методом представлено на рис. 3. Выход негабарита – 9,4%.

При применении электронных детонаторов выход негабарита после проведения БВР на блоке №2-2 составил менее 3% (рис. 4).

Суть метода оценки качества дробления заключается в автоматизированном определении размеров кусков и их процентного содержания в общем объеме взорванной

¹ Motion Metrics International. Available at: <https://www.mining-technology.com/products/portametrics/> (accessed: 20.03.2026).

² Motion Metrics International. Available at: <https://www.mining-technology.com/products/portametrics/> (accessed: 20.03.2026).



Рис. 1
Снимки горной массы и анализ гранулометрического состава взорванного блока №1-1

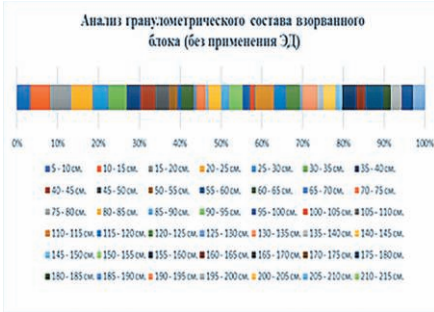
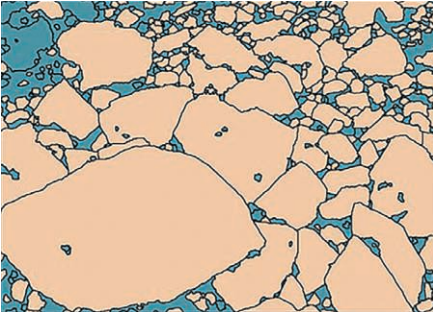


Fig. 1
Images of the rock mass and particle size distribution analysis of blasted block No. 1-1



Рис. 2
Снимки горной массы и анализ гранулометрического состава взорванного блока №1-2 при применении электронных детонаторов

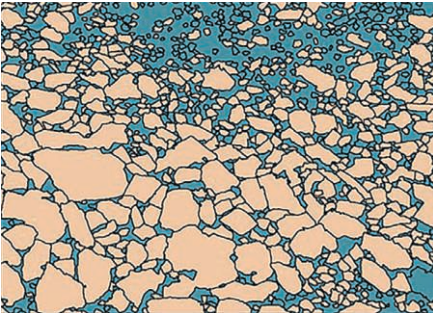


Fig. 2
Images of the rock mass and particle size distribution analysis of blasted block No. 1-2 when using electronic detonators



Рис. 3
Снимки горной массы и анализ гранулометрического состава взорванного блока №2-1

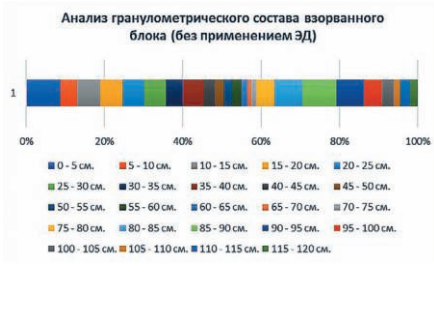
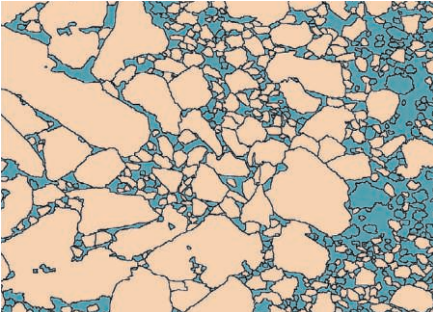


Fig. 3
Images of the rock mass and particle size distribution analysis of blasted block No. 2-1



Рис. 4
Снимки горной массы и анализ гранулометрического состава взорванного блока №2-2 при применении электронных детонаторов

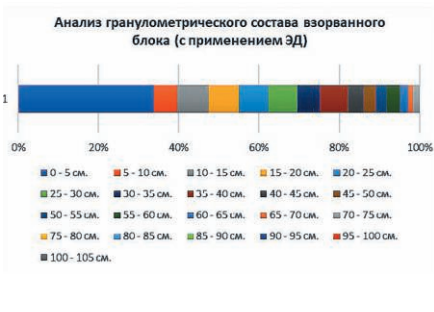
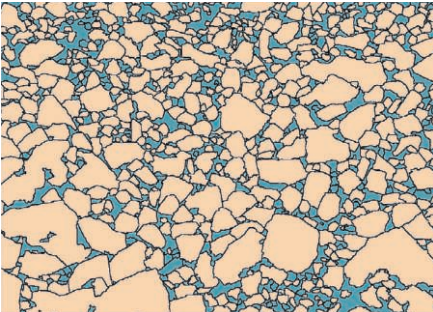


Fig. 4
Images of the rock mass and particle size distribution analysis of blasted block No. 2-2 when using electronic detonators

горной массы. Использование PortaMetrics позволяет оперативно оценить эффективность взрыва, выявить недостатки в проектировании и оптимизировать параметры для достижения требуемого гранулометрического состава.

Система включает в себя фотосъемку взорванной горной массы с использованием калиброванного оборудования, последующую обработку изображений с помощью специализированного программного обеспечения и статистический анализ полученных данных. Результатом является детальный отчет, содержащий информацию о распределении кусков по размерам, коэффициенте неоднородности, среднем размере куска и других параметрах, характеризующих качество дробления. Комплексный анализ применения разных способов инициирования взрывных блоков позволяет оценить и скорректировать процесс взрыва на этапе проектирования. При этом стоит учитывать не только способ инициирования, но и распределение физико-механических свойств пород в массиве.

Как правило, погрешность задержки ЭД составляет $\pm 0,01\%$ от времени задержки. Главный недостаток ЭД заключается в том, что они более чем в 10 раз дороже обычных детонаторов, что существенно ограничивает их применение в горнодобывающей отрасли, тем не менее в промышленных условиях электронные детонаторы упрощают контроль времени замедления и значительно повышают качество дробления горной массы [11; 12].

Выводы

Применение ЭД при прочих равных условиях привело к улучшению качества взрыва и уменьшению выхода негабарита до 1–3%. Однако для реализации всего потенциала ЭД необходима грамотная интеграция в технологический

процесс БВР. Это предполагает детальное геологическое изучение месторождения, точный расчет параметров бурения и взрывания, а также использование специализированного программного обеспечения для моделирования и оптимизации схем взрывания. Обучение и повышение квалификации персонала также играют ключевую роль в успешном внедрении ЭД.

Электронная система инициирования дает возможность взрывания блоков нестандартной конфигурации, обусловленной сложными горно-геологическими условиями, а также каскадных взрывов нескольких блоков одновременно или последовательно за счет того, что срабатывание детонатора произойдет в четко запрограммированное время после подачи команды для производства взрыва.

В настоящее время мировые лидеры горнодобывающей промышленности активно внедряют ЭД на своих предприятиях, осознавая их потенциал для повышения эффективности, безопасности и экологической устойчивости производства.

Для роста доли потребления электронных детонаторов на предприятиях необходимо пересматривать технологию их применения с внедрением новых подходов по проектированию схем взрывания с учётом целей взрывания. Дальнейшее развитие данной технологии и расширение области ее применения являются одними из приоритетных направлений развития взрывного дела в мире.

Список литературы / References

1. Малинин Ю.А., Гриб Н.Н. Повышение эффективности и безопасности буровзрывных работ на Эльгинском каменноугольном месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(12-2):100–115. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_100
Malinin Yu.A., Grib N.N. Improving the efficiency and safety of drilling and blasting operations at the elga coal deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(12-2):100–115. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_100
2. Комаров Д.С., Альтмаер Е.Э., Мамаева М.С. Внедрение современных электронных систем инициирования при ведении взрывных работ на горнодобывающих предприятиях. В кн.: Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., г. Экибастуз, 12 мая 2023 г. Прокопьевск: Кузбасский государственный технический университет; 2023. С. 29–32.
3. Жуликов В.В., Князев К.А., Назаров С.С. Обоснование эффективности взрывных работ с использованием электронных систем в сравнении с неэлектрическими средствами инициирования. *Горная промышленность*. 2022;(5):64–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-64-68>
Zhulikov V.V., Knyazev K.A., Nazarov S.S. Justification of blasting efficiency using electronic systems in comparison with non-electric primers. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):64–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-64-68>
4. Брухавецкая А.О. Анализ современных разработок в области оценки качества дробления взорванной горной массы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(5):18–31. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_0_18
Brukhavetskaya A.O. Current achievements in blasted rock fragmentation quality assessment: Review. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(5):18–31. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_0_18

5. Казаков Н.Н., Шляпин А.В., Лапиков И.Н.1 Молодчина Л.И. Выбор классов крупности при измерении и расчетах грансостава в верхней зоне карьерного уступа. *Взрывное дело*. 2022;(136-93):99–110.
Kazakov N.N., Shlyapin A.V., Lapikov I.N., Molodchinina L.I. Selection of size classes for measuring and calculating granulometric composition in the upper zone of the quarry block. *Explosion Technology*. 2022;(136-93):99–110. (In Russ.)
6. Ракишев Б.Р., Орынбай А.А., Ауэзова А.М., Куттыбаев А.Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):83–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
Rakishhev B.R., Orynbay A.A., Auezova A.M., Kuttybaev A.E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):83–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
7. Xu P., Yang R., Zuo J., Ding C., Chen C., Guo Y. et al. Research progress of the fundamental theory and technology of rock blasting. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29(4):705–716. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2464-x>
8. Котышев А.А. Оценка целесообразности применения электронных детонаторов Искра Т-500-18 для инициирования скважинных зарядов из ЭВВ. *Проблемы недропользования*. 2021;(2):63–69. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/465> (дата обращения: 10.03.2026).
Kotyashhev A.A. Evaluation of expediency of using electronic detonator Iskra T-500-18 for initiating borehole EEM charges. *Problems of Subsoil Use*. 2021;(2):63–69. (In Russ.) Available at: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/465> (accessed: 10.03.2026).
9. Leng Z., Fan Y., Lu W., Gao Q., Yang G. Failure mechanisms of electronic detonators subjected to high impact loading in rock drilling and blasting. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2025;12:10. <https://doi.org/10.1007/s40789-025-00749-6>
10. Leng Z., Sun J., Lu W., Xie X., Jia Y., Zhou G., Chen M. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation. *Computers and Geotechnics*. 2021;129:103873. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103873>
11. Wu X., Gong M., Wu H., Liu X. Parameter calculation of the initiating circuit with mixed use of nonel detonators and electronic detonators in tunnel controlled-blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;113:103975. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103975>
12. Zhang X., Yan P., Lu W., Cheng Y., Sun C., Zhu J. et al. Frequency spectrum characteristics of blast-induced vibration with electronic detonators in ground blasting. *Journal of Building Engineering*. 2023;74:106892. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106892>

Информация об авторах

Малинин Юрий Анатольевич – старший преподаватель кафедры горного дела, Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7473-2808>; e-mail: alkor.05@mail.ru

Гриб Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Российская Федерация; Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3818-9473>; e-mail: grib-n-n@yandex.ru

Information about the authors

Yuri A. Malinin – Senior Lecturer, Mining Department, Nerungri Technical Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Nerungri, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7473-2808>; e-mail: alkor.05@mail.ru

Nikolai N. Grib – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mining Engineering Department, Nerungri Technical Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Nerungri, Russian Federation; Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3818-9473>; e-mail: grib-n-n@yandex.ru

Article info

Received: 20.03.2026

Revised: 18.05.2026

Accepted: 01.06.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.03.2026

Поступила после рецензирования: 18.05.2026

Принята к публикации: 01.06.2026