

Разработка и формализация интегрального критерия для адаптивного управления параметрами буровзрывных работ на карьерах

В.Л. Яковлев, С.Н. Жариков, А.С. Реготунов, В.А. Кутуев✉

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ 9634447996@mail.ru

Резюме: В статье представлен разработанный интегральный критерий адаптации – нормализованная количественная мера $K_{\text{адапт}}$ – для выбора рациональных технических приемов при проектировании буровзрывных работ. Данная мера объединяет в единую безразмерную величину частные критерии эффективности и безопасности: качество дробления, сейсмическую безопасность, дальность разлета кусков, соответствие импульса взрыва свойствам массива и экономические затраты. Весовые коэффициенты интегрального критерия отражают производственные приоритеты предприятия между эффективностью и безопасностью. Для сравнения различных вариантов технических приемов предлагается использовать радарную диаграмму, которая визуализирует вклад каждого частного критерия. Рациональным признается прием (или их комбинация), для которого интегральный критерий максимально приближен к единице, что соответствует балансу всех учитываемых параметров. Статья содержит методику выбора весовых коэффициентов. Предложенный инструментарий позволяет комплексно оценивать и оптимизировать параметры буровзрывных работ при изменении горно-геологических и горнотехнических условий при разработке сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: буровзрывные работы, интегральный критерий, адаптация параметров, безопасность взрывных работ, эффективность дробления, сейсмическое воздействие, разлет кусков

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00408-26-00, темы 1 (2025–2027): Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001), рег. №1022040200004-9-1.5.1.

Для цитирования: Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Разработка и формализация интегрального критерия для адаптивного управления параметрами буровзрывных работ на карьерах. *Горная промышленность*. 2026;(2):56–60. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-56-60>

Development and formalization of an integral criterion for adaptive control of the drilling-and-blasting parameters in open-pit mines

V.L. Yakovlev, S.N. Zharikov, A.S. Regotunov, V.A. Kutuev✉

Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ 9634447996@mail.ru

Abstract: The article presents an integral adaptation criterion developed by the authors, which is a normalized quantitative measure (K_{adapt}) for selecting rational techniques in designing drilling and blasting operations. This measure combines specific criteria of efficiency and safety into a single dimensionless value: quality index of fragmentation, seismic safety, flyrock travel range, correspondence of the blast pulse to the rock mass properties, and economic costs. The weight factors of the integral criterion reflect the production priorities of the company regarding the balance between efficiency and safety. For a clear comparison of different technique options, the authors propose using a radar chart, which visualizes contribution of each specific criterion. A technique (or a combination of techniques) is considered rational if its integral criterion is closest to one, which corresponds to the optimal balance of all the considered parameters. The article provides a methodology for selecting the weight factors. The proposed approach helps to make a comprehensive assessment and optimization of the drilling-and-blasting design parameters in response to changes in the mining-geological and mining-engineering conditions during the development of complex-structure solid mineral deposits.

Keywords: Drilling-and-blasting operations, integral criterion, parameter adaptation, blasting safety, fragmentation efficiency, seismic impact, flyrock travel range

Acknowledgements: The research was carried out as part of State Assignment No. 075-00408-26-00, Topic 1 (2025–2027): Methodology for justification of prospects for technological development in the integrated development of Russia's solid mineral resources (FUWE-2025-0001), reg. No. 1022040200004-9-1.5.1.

For citation: Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. Development and formalization of an integral criterion for adaptive control of the drilling-and-blasting parameters in open-pit mines. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):56–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-56-60>

Введение

Современные буровзрывные работы (БВР) на карьерах требуют постоянной адаптации к изменяющимся условиям. Эта необходимость обусловлена неоднородностью массивов, многообразием свойств взрывчатых веществ (ВВ), а также ужесточением требований как к промышленной безопасности, так и к экономической эффективности процессов. В настоящее время оценка качества взрывных работ проводится по ряду частных критериев: среднему размеру куска [1–5], сейсмическому воздействию¹ [6–17], разлету кусков породы² [18–20], минимуму затрат [21; 22]. Однако каждый из этих критериев, как правило, анализируется изолированно, что не позволяет комплексно оценить влияние конкретных технических приемов, таких как изменение конструкции заряда, типа ВВ, порядка, схемы и типа системы инициирования, на итоговую эффективность и безопасность БВР.

В связи с этим возникает необходимость в разработке интегрального подхода, который позволил бы объединить разнородные критерии в единую количественную меру, отражающую аспекты безопасности, а также технологические и экономические приоритеты горнодобывающего предприятия, что должно обеспечивать возможность сравнительной оценки различных комбинаций технических приемов, их оперативной корректировки на основе данных мониторинга и адаптации к изменяющимся условиям ведения работ.

Целью исследования является формализация интегрального критерия как инструмента для поддержки принятия решений при проектировании и оперативном управлении буровзрывными работами в изменяющихся условиях разработки сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых.

Результаты

Интегральным критерием адаптации является нормализованная количественная мера $K_{\text{адапт}}$, служащая единственным достаточным основанием для сравнительной оценки и выбора рациональных технических приемов БВР. Данная мера представляет собой результат свертки ключевых параметров в единую безразмерную величину, рассчитываемую по математической модели, объединяющей частные нормализованные критерии эффективности и безопасности БВР в соответствии с формулой

$$K_{\text{адапт}} = \alpha K_{\text{д}} + \beta K_{\text{р}} + \gamma K_{\text{с}} + \chi K_{\text{э}} + \theta K_{\text{имп}},$$

$$d_{\text{р}} \leq d_{\text{к}}; L_{\text{р}} \leq L_{\text{д}}; V_{\text{р}} \leq V_{\text{д}}; K_{\text{адапт}} \rightarrow 1, \quad (1)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \chi, \theta$ – весовые коэффициенты, характеризующие приоритеты предприятия в отношении частных критериев эффективности и безопасности, причем $\alpha, \beta, \gamma, \chi, \theta \in [0; 1]$, а их сумма равна 1; $K_{\text{д}} = \frac{d_{\text{р}}}{d_{\text{к}}}$ – нормализованный критерий качества дробления, равный отношению расчетного размера куска при выбранной комбинации технических приемов $d_{\text{р}}$, м, к кондиционному размеру куска горной породы $d_{\text{к}}$, м; $K_{\text{р}} = \frac{L_{\text{р}}}{L_{\text{д}}}$ – нормализованный критерий дальности разлета кусков породы, равный отношению расчетной дальности разлета при выбранной комбинации технических приемов $L_{\text{р}}$, м, к допустимой дальности разлета кусков породы, с учетом ограничивающих факторов $L_{\text{д}}$, м; $K_{\text{с}} = \frac{V_{\text{р}}}{V_{\text{д}}}$ – нормализованный критерий скорости колебаний, равный отношению расчетной скорости колебаний породы при выбранной комбинации технических приемов $V_{\text{р}}$, см/с, к допустимой скорости колебаний породы $V_{\text{д}}$, см/с; $K_{\text{э}} = (1 - \frac{C_{\text{р}}}{C_{\text{н}}})$ – нормализованный критерий затрат, равный отношению расчетных затрат на взрывную отбойку при выбранной комбинации технических приемов $C_{\text{р}}$, руб/м³, к плановым затратам на взрывную отбойку выемочного блока, $C_{\text{н}}$, руб/м³; $K_{\text{имп}} = \frac{I_{\text{проект}}}{I_{\text{дост}}}$ – нормализованный критерий соответствия проектного импульса взрыва $I_{\text{проект}}$, Н·с, к достаточному импульсу $I_{\text{дост}}$, Н·с [23].

Правило применения критерия: рациональным признается вариант технических приемов, для которого значение $K_{\text{адапт}}$ максимально и наиболее близко к единице, что соответствует наилучшему балансу учитываемых параметров. Максимум $K_{\text{адапт}}$ – это 1. Значения $d_{\text{р}}$, $L_{\text{р}}$, $V_{\text{р}}$ определяются с учетом величины $I_{\text{проект}}$.

На основе методики, изложенной в статье д-ра техн. наук А.В. Глебова [24], предложен порядок выбора весовых коэффициентов для интегрального критерия адаптации параметров БВР, представленный на рис. 1.

В настоящее время продолжается сбор и анализ данных для обоснования вариантов соответствия весовых коэффициентов в различных массивах.

С помощью интегрального критерия адаптации количественно оценивается, насколько выбранные технические приемы БВР соответствуют поставленным частным критериям эффективности и безопасности, а именно:

- качеству дробления (кондиционному размеру среднего куска в развале);
- сейсмической безопасности (скорости колебаний грунта);
- дальности разлета кусков;
- соответствию между импульсом взрыва и свойствами массива;
- затратам на взрывную отбойку на 1 м³.

Наглядно результаты количественной оценки представлены на радарной диаграмме (рис. 2). Количество осей соответствует количеству нормализованных критериев эффек-

¹ Indian Standard Institute. IS 6922: Criteria for safety and design of structures subject to underground blasts. Karnataka, India, 1973. Available at: <https://archive.org/details/gov.in.is.6922.1973/> (accessed: 26.12.2025).

² Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. 3-е изд. перераб. и доп. М.: АО «Институт Гидропроект»; 1997. 232 с.

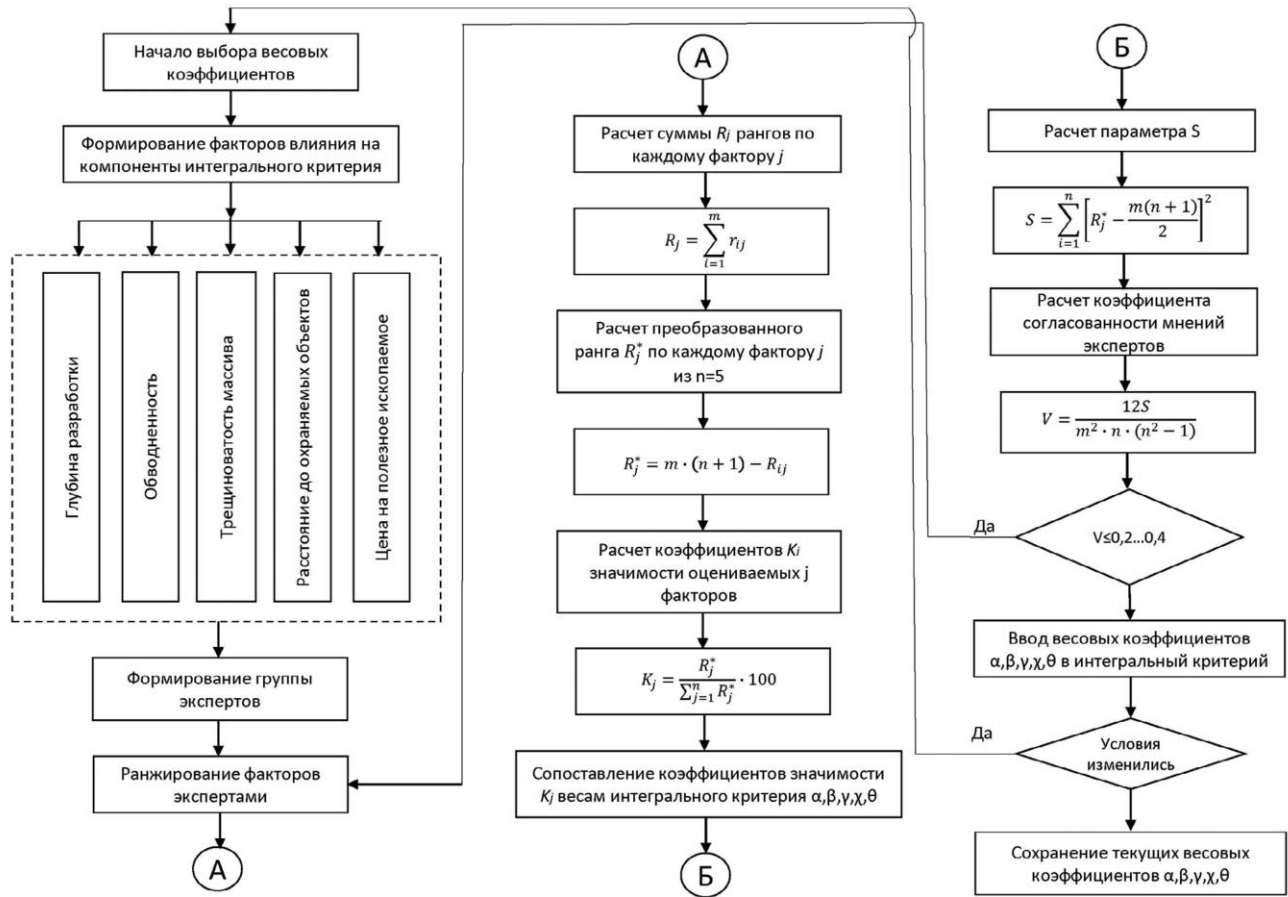
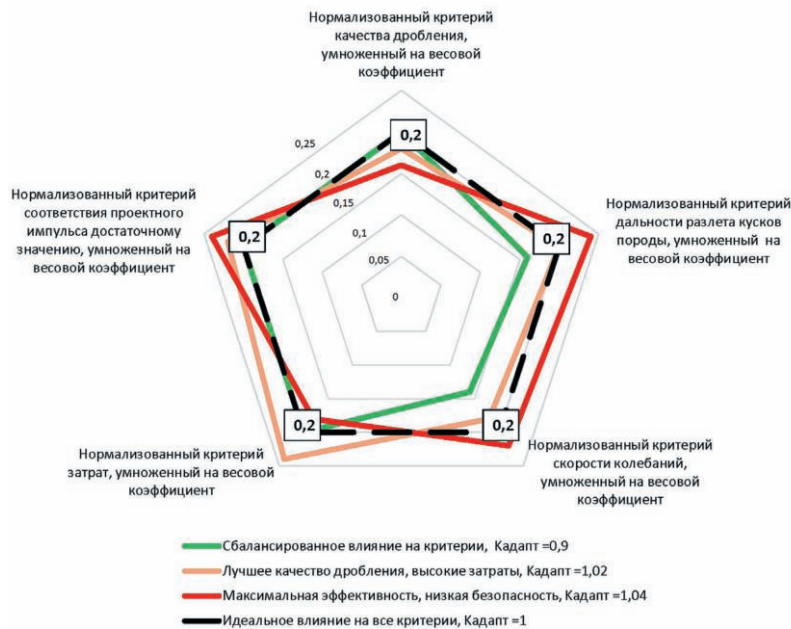


Рис. 1
 Блок-схема методики выбора весовых коэффициентов, характеризующих приоритетные критерии эффективности / безопасности предприятия

Fig. 1
 Flowchart of the methodology for selecting weight factors that characterize the company's priority criteria in efficiency / safety

тивности и безопасности. Диаграмма позволяет сравнить влияние различных технических приемов на компоненты интегрального критерия, нормализованные критерии и выбрать наилучший технический прием (или их комбинацию), при котором в отличие от других вариантов приемов наибольшее количество нормализованных критериев, умноженных на весовой коэффициент, будет достигать 0,2,

а значение интегрального критерия адаптации будет наиболее близко к единице. Идеальный случай адаптации – это когда все частные нормализованные критерии, умноженные на весовые коэффициенты, равны 0,2 и интегральный критерий адаптации равен единице. На диаграмме идеальная адаптация представлена в форме правильного многоугольника с пятью сторонами, изображенными пунктирными линиями. Вершины такого многоугольника имеют координаты (0; 0,2).



Из радарной диаграммы следует, что предпочтительным техническим приемом является тот, который обеспечивает равенство 0,2 трем из пяти частных нормализованных критериев, умноженным на их весовые коэффициенты (неправильный многоугольник с пятью сторонами зеленого цвета). Второй вариант технического приема обеспечивает равенство 0,2 только для одного нормализованного критерия дальности разлета кусков породы, умноженного на свой вес. В этом случае

Рис. 2
 Диаграмма всесторонней количественной оценки соответствия выбранных технических приемов поставленным частным критериям эффективности и безопасности

Fig. 2
 Radar chart for comprehensive quantitative assessment of the techniques compliance with the specific efficiency and safety criteria

обеспечивается лучшее качество дробления, но при высоких затратах. Третий вариант технического приема не обеспечивает ни для одного критерия значение, равное 0,2. Однако при этом стоит ожидать максимальную эффективность, но низкую промышленную безопасность (неправильный многоугольник со сторонами красного цвета). Следует отметить, что интегральный критерий адаптации стремится к единице, но не должен превышать её. Единица – это максимум. Поэтому значения выше единицы – неприемлемые.

Таким образом, можно оценить и соответствующим образом учесть применение метода адаптации при проектировании БВР до момента значимого изменения условий производства, установленного по итогам мониторинга. Для выбора технических приемов, соответствующих новым условиям, порядок действий адаптации повторяется.

Для оценки влияния на смежные процессы при использовании интегрального критерия выбора рациональных технических приемов при реализации поэтапного подхода необходимо в дальнейших исследованиях установить расчетные зависимости, позволяющие количественно определить влияние импульса взрыва скважинного заряда на размер среднего куска в развале, дальность разлета кусков горной массы и скорость колебаний массива горных пород.

Заключение

Разработан интегральный критерий $K_{\text{адапт}}$ для реализации адаптивного управления буровзрывными работами. Он представляет собой формализованную меру, объеди-

няющую пять ключевых частных нормализованных критериев: качество дробления, сейсмическую безопасность, дальность разлета кусков горной породы, соответствие импульса взрыва свойствам массива и экономические затраты. Важной особенностью критерия является введение системы весовых коэффициентов, которая позволяет оперативно отражать меняющиеся приоритеты горного производства между эффективностью и безопасностью, обеспечивая динамическую корректировку модели под конкретные технологические задачи. Таким образом, предложенный подход не только позволяет комплексно оценивать варианты БВР, но и создает основу для их оперативной адаптации к изменяющимся условиям в динамике развития горнотехнических систем.

Для практической реализации данного инструмента основным направлением дальнейших исследований является переход от теоретического обоснования к промышленной апробации. Ключевой задачей является сбор и анализ натуральных данных для подтверждения расчетных зависимостей и, что наиболее важно, для эмпирического обоснования и типизации значений весовых коэффициентов под различные производственные сценарии. В итоге это позволит применять разработанный критерий для оперативного выбора рациональных технических приемов БВР в реальных условиях карьеров.

Список литературы / References

1. Казаков Н.Н. *Взрывная отбойка руд скважинными зарядами*. М.: Недра; 1975. 192 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/22396> (дата обращения: 26.12.2025).
2. Ханукаев А.Н. *Физические процессы при отбойке горных пород взрывом*. М.: Недра; 1974. 224 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/35898> (дата обращения: 26.12.2025).
3. Mutinda E.K., Alunda B.O., Maina D.K., Kasomo R.M. Prediction of rock fragmentation using the Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony model. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021;121(3):107–112. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1401/2021>
4. Lawal A.I. A new modification to the Kuz-Ram model using the fragment size predicted by image analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;138:104595. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104595>
5. Ouchterlony F., Sanchidrián J.A. A review of development of better prediction equations for blast fragmentation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1094–1109. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.03.001>
6. Садовский М.А. *Избранные труды: геофизика и физика взрыва*. М.: Наука; 2004. 440 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/21916> (дата обращения: 26.12.2025).
7. Мосинец В.Н. *Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах*. М.: Недра; 1976. 271 с.
8. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. *Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов*. М.: Недра; 1981. 192 с.
9. Кутузов Б.Н. (ред.) *Безопасность взрывных работ в промышленности*. М.: Недра; 1992. 544 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/22119> (дата обращения: 26.12.2025).
10. Миронов П.С. *Взрывы и сейсmobезопасность сооружений*. М.: Недра; 1973. 168 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/27928> (дата обращения: 26.12.2025).
11. Кутуев В.А. Анализ методик прогнозирования уровня сейсмического воздействия взрывов на охраняемые объекты и мероприятия по снижению сейсмичности. *Взрывное дело*. 2025;(146/103):133–150. Kutuev V.A. Analysis of methods for predicting the level of seismic impact of explosions on protected objects and measures to reduce seismicity. *Explosion Technology*. 2025;(146/103):133–150. (In Russ.)
12. Богацкий В.Ф., Фридман А.Г. *Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов*. М.: Недра; 1982. 162 с.
13. Верхоланцев А.В., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Шкурко А.В. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау». *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019;(2):59–69. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190207>
Verkhohlantsev A.V., Dyagilev R.A., Shulakov D.Y., Shkurko A.V. Monitoring of earthquake loads from blasting in the Shakhtau open pit mine. *Journal of Mining Science*. 2019;55(2):229–238. <https://doi.org/10.1134/S1062739119025503>

14. Duvall W.I., Petkof B. *Spherical Propagation of Explosion-generated Strain Pulses in Rock*. Washington: Bureau of mines; 1959. 21 p.
15. Langefors U., Kihlstrom B. *The modern technique of rock blasting*. New York: John Wiley and Sons; 1978. 438 p. Available at: <https://www.geokniga.org/books/42009> (accessed: 26.12.2025).
16. Holmberg R., Persson P.A. The Swedish approach to contour blasting. In: *Proceedings of the 4th Conference on Explosives and Blasting Technique, Society of Explosives Engineers, New Orleans, Louisiana, February 10–15, 1978*, pp. 113–127.
17. Аленичев И.А., Рахманов Р.А., Шубин И.Л. Оценка действия взрыва скважинного заряда в ближнем поле с целью оптимизации параметров буровзрывных работ в приконтурной зоне карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(4):85–95. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-85-95>
Alenichev I.A., Rakhmanov R.A., Shubin I.L. Assessment of near-field blast effect toward optimized drilling-and-blasting in pit wall rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(4):85–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-85-95>
18. Докучаев М.М., Васильев Г.А., Дороницева Л.А. *Справочник по буровзрывным работам на строительстве*. М.: Госстройиздат; 1962. 392 с.
19. Друкованный М.Ф., Куц В.С., Ильин В.И. *Управление действием взрыва скважинных зарядов на карьерах*. М.: Недра; 1980. 223 с.
20. Ганопольский М.И., Кантор В.Х., Пупков В.В., Фоменкова В.Е. *Вредные эффекты промышленных взрывов. Безопасные расстояния при взрывных работах на земной поверхности и в подземных выработках*. М.: Спутник +; 2024. 304 с.
21. Василец Н.В. (ред.). *Методика определения оптимальной степени дробления скальных пород и руд на карьерах МЧМ СССР (Временная)*. Свердловск; 1971. 41 с.
22. Рашкин А.В., Селезнев С.Ю., Якимов А.А. *Выбор и обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ на карьерах*. Чита: ЧитГУ; 2007. 137 с.
23. Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Теоретическое обоснование метода адаптации параметров буровзрывных работ к условиям сложноструктурных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025;(3):64–75. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20250307>
Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. Theoretical substantiation of adaptation process to adjust drilling and blasting patterns to structurally complex mineral deposits. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2025;(3):64–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRI20250307>
24. Глебов А.В. Определение значимости показателей при оценке уровня качества геотехники. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(1):123–137. <https://doi.org/10.25635/s4974-2813-4981-k>
Glebov A.V. Determining the significance of indicators in the assessment the quality of geotechnics. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(1):123–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/s4974-2813-4981-k>

Информация об авторах

Яковлев Виктор Леонтьевич – доктор технических наук, профессор, советник РАН, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5860-9626>; e-mail: yakovlev@igduran.ru

Жариков Сергей Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0322-9973>; e-mail: 333vista@mail.ru

Реготунов Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5503-9397>; e-mail: pochta8400@inbox.ru

Кутуев Вячеслав Александрович – научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>; e-mail: 9634447996@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.01.2026

Поступила после рецензирования: 16.02.2026

Принята к публикации: 20.02.2026

Information about the authors

Viktor L. Yakovlev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Advisor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5860-9626>; e-mail: yakovlev@igduran.ru

Sergey N. Zharikov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Leading Researcher, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0322-9973>; e-mail: 333vista@mail.ru

Andrey S. Regotunov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5503-9397>; e-mail: pochta8400@inbox.ru

Vyacheslav A. Kutuev – Researcher, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>; e-mail: 9634447996@mail.ru

Article info

Received: 11.01.2026

Revised: 16.02.2026

Accepted: 20.02.2026