

Разработка инновационного подхода к адаптивному управлению буровзрывными работами на сложноструктурных месторождениях

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 представлены результаты разработки структурной схемы для поэтапного адаптивного управления параметрами буровзрывных работ при освоении сложноструктурных месторождений полезных ископаемых открытым способом. Актуальность исследования обусловлена недостаточной эффективностью существующих статических методов проектирования буровзрывных работ в условиях неоднородного геологического строения, высокой трещиноватости и переменных физико-механических свойств горных пород, что приводит к ресурсным и энергетическим потерям, а также увеличению сейсмического воздействия. Методологическую основу исследования составляют положения зонной теории взрыва и теории импульса действия взрыва скважинного заряда. Разработанная формализованная блок-схема описывает итеративный процесс адаптации, включающий этапы: непрерывный мониторинг и сбор исходных данных, в том числе оценку напряженного состояния массива через акустический импеданс породы, анализ текущих горно-геологических условий и проектных решений, а также многокритериальный выбор рациональных технических приемов. Систематизированы приемы управления, воздействующие на пиковое давление и время его действия, которые сгруппированы по направлениям: изменение параметров заряда (рассредоточение, зарядание в рукава, тип взрывчатого вещества) и пространственно-временное управление взрывами (порядок, схема и тип системы инициирования). Целью применения схемы является корректировка проектного импульса взрыва до достаточного значения, обеспечивающего эффективную дезинтеграцию пород при одновременном снижении сейсмического эффекта в окружающем массиве. Предложенный подход направлен на создание научно обоснованного инструмента для динамической оптимизации буровзрывных работ, повышающего технологическую эффективность, безопасность горного производства на сложноструктурных месторождениях.

Ключевые слова: сложноструктурные месторождения, буровзрывные работы, адаптивное управление, импульс взрыва, зонная теория взрыва, акустический импеданс, технические приемы дезинтеграции, пространственно-временное управление взрывами, сейсдобезопасность, структурная схема адаптации

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. №125070908257-0

Для цитирования: Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Разработка инновационного подхода к адаптивному управлению буровзрывными работами на сложноструктурных месторождениях. *Горная промышленность*. 2026;(3):179–184. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-179-184>

An adaptive control framework for drilling and blasting operations in complex-structured deposits

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 paper presents the results of developing a structural framework for phased adaptive control of drilling and blasting parameters in open-pit mining of complex-structured mineral deposits. The relevance of the study is driven by insufficient efficiency of the existing static drilling and blasting design methods in conditions of non-uniform subsurface geology, high rock fracturing, and varying physical and mechanical properties of rocks. This leads to resource and energy losses, as well as an increased seismic impact. The methodological foundation of the work is based on the principles of the explosion zone theory and the blast impulse theory of the borehole charge. The developed formalized block diagram describes an iterative adaptation process, which includes the following stages: continuous monitoring and collection of the initial data, involving assessment of the rock mass stress state through acoustic impedance analysis; analysis of the current mining-geological conditions and design solutions; and multi-criteria selection of the rational techniques. Management techniques affecting the peak pressure and

its duration are systematized and grouped into two main categories, i.e. modification of the charge parameters (decking, sleeve charging, explosive type) and spatiotemporal control of the blast (sequence, initiation pattern, and type of the initiation system). The objective of applying this framework is to adjust the design blast pulse to a sufficient level that would ensure efficient rock fragmentation while simultaneously reducing the seismic effect on the surrounding rock mass. The proposed approach aims to create a scientifically grounded tool for dynamic optimization of the drilling and blasting operations, enhancing technological efficiency and safety when mining complex-structured deposits.

Keywords: complex-structured deposits, drilling and blasting operations, adaptive control, explosion pulse, zonal theory of blasting, acoustic impedance, rock fragmentation techniques, spatiotemporal blast control, seismic safety, adaptation block diagram

Acknowledgments: The research was performed within the framework of the State Assignment No.075-00408-26-00, Topic 1 (2025–2027): A methodology for assessing the prospects for technological progress in integrated development of solid mineral resources in the Russian Federation (FUWE-2025-0001), Reg. No.125070908257-0

For citation: Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. An adaptive control framework for drilling and blasting operations in complex-structured deposits. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):179–184. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-179-184>

Введение

В настоящее время горнодобывающая промышленность России столкнулась с необходимостью освоения сложноструктурных месторождений, характеризующихся неоднородностью геологического строения, высокой трещиноватостью и изменчивостью физико-механических свойств пород. Существующие методы проектирования буровзрывных работ (БВР), основанные на статичном подходе, часто оказываются неэффективными в таких условиях, что приводит к нерациональному использованию ресурсов, избыточным энергозатратам, усилению сейсмического воздействия и росту экологических рисков. Разработка адаптивного метода, способного динамически получать данные и корректировать параметры взрывных работ в зависимости от изменяющихся свойств массива горных пород, является актуальной научно-технической задачей, решение которой направлено на повышение эффективности и безопасности горных работ на горнодобывающих предприятиях России.

Результаты

На основе зонной теории [1–6] и положений теории импульса действия взрыва [1; 3; 7–13] разработана поэтапная схема адаптации процессов дезинтеграции локальных массивов сложной структуры [14] в виде блок-схемы, представленной на рис. 1. Поэтапный подход схемы сводится к корректировке проектного импульса до достаточного импульса, который обеспечивает качественное дробление в зоне регулируемого дробления при минимальном негативном воздействию в остальных зонах. Для корректировки импульса используется классификация технических приемов (табл. 1), воздействующих на пиковое давление и время его действия:

- управление зарядом: рассредоточение, зарядание в рукава, тип взрывчатого вещества (ВВ) (высоко- или низкоскоростные).

- пространственно-временное управление: порядок инициирования промежуточных детонаторов (прямое, обратное, встречное), схема инициирования поверхностной сети, тип системы инициирования (электронная, неэлектронная).

Подход состоит из следующих этапов:

- мониторинг и сбор исходных данных (включая акустический импеданс);

- анализ и оценка текущих горно-геологических условий и проектных параметров БВР;

- многокритериальный выбор рациональных технических приемов адаптации либо их комбинации;

- корректировка проектного импульса взрыва и применение выбранных технических приемов;

- возврат к мониторингу (итеративный процесс).

Мониторинг осуществляется в соответствии с методикой ИГД УрО РАН [15] с учетом методических материалов, отмеченных в [16]. Информация используется совместно с построенными моделями изменчивости структурно-прочностных свойств массива для определения вариантов конструкции зарядов ВВ, порядка, схем и направления инициирования и типа систем инициирования.

Действующие механические напряжения в массиве, изменяющиеся с глубиной разработки сложноструктурного месторождения, учитываются косвенно через акустический импеданс горной породы [6]:

$$Z = V_p \cdot \rho, \quad (1)$$

где V_p – скорость продольной волны в массиве горных пород, м/с; ρ – плотность горной породы, кг/м³.

Указанный импеданс применяется также в расчете для выбора рационального типа ВВ:

$$\frac{D \cdot \rho_{ВВ}}{z} = 0,8 - 1,0, \quad (2)$$

где D – скорость детонации применяемого ВВ в скважине, м/с; $\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, кг/м³.

Взаимосвязь акустического импеданса горной породы с действующими напряжениями проявляется в том, что механические напряжения (сжатие / растяжение) меняют плотность породы за счет уплотнения или разуплотнения, что оказывает влияние на скорость продольных волн в массиве горных пород. В зонах сжатия плотность горной породы увеличивается, акустический импеданс также становится больше; в зонах растяжения – наоборот.

Направления главных сжимающих и растягивающих напряжений σ_1 и σ_3 [17], действующих в массиве, предложено предварительно учитывать при обосновании рациональных к применению технических приемов через коэффициент повышения скорости продольных волн k_σ :

$$k_\sigma = 1 + \aleph_{\Pi} \left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}} - 1 \right), \quad (3)$$

где \aleph_{Π} – коэффициент потерь энергии волны в массиве, определяемый экспериментально; V_{p1} – скорость продольной волны в направлении главного сжимающего напряже-

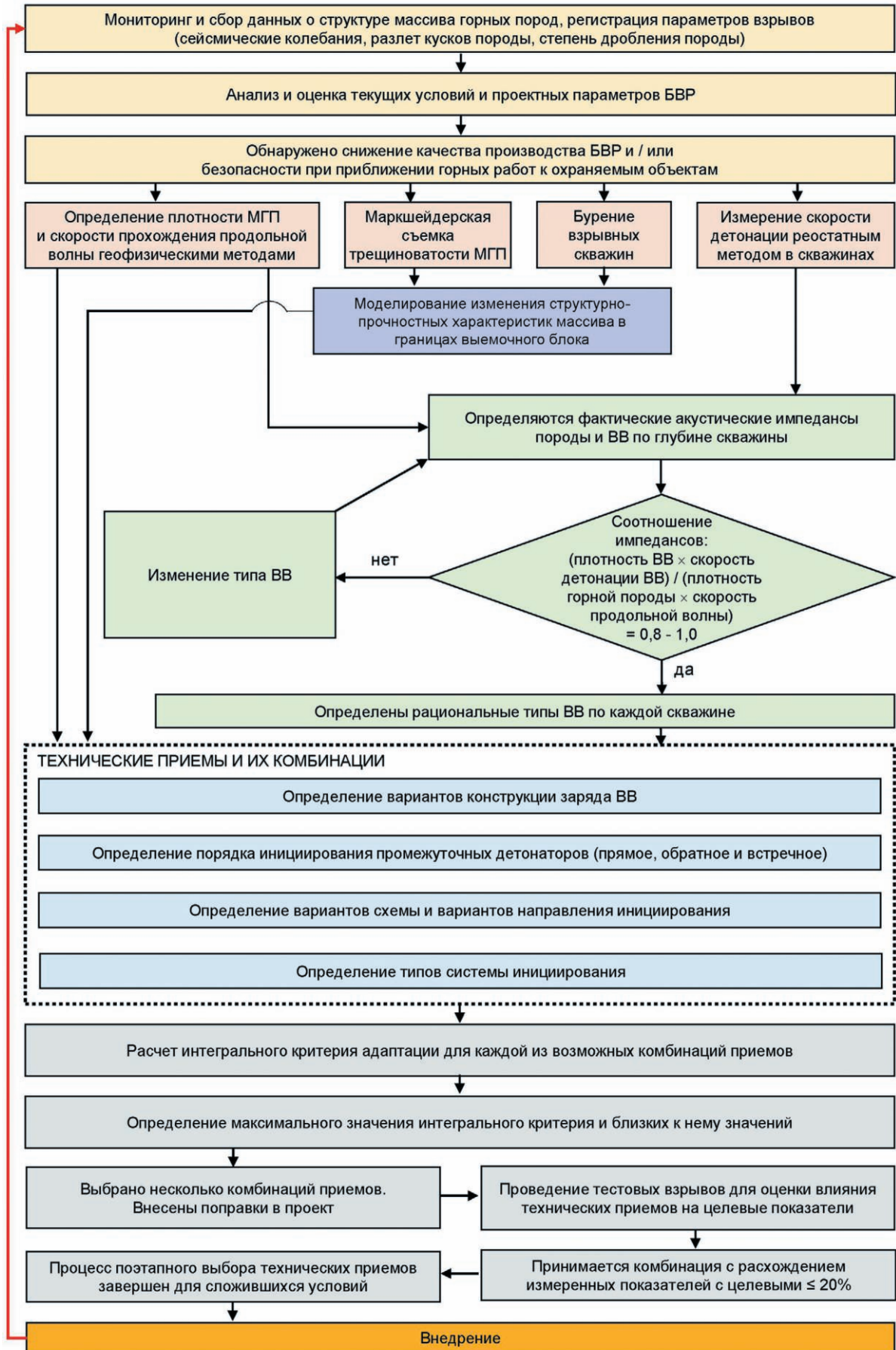


Рис. 1
Структурная схема поэтапной адаптации параметров БВР
Источник: [14]

Fig. 1
The share of pollutant emissions from various industries in the Sverdlovsk Region, %
Source: [14]

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ

Drilling and blasting operations

Таблица 1
Классификация основных технических приемов адаптации параметров буровзрывных работ

Table 1
A classification of the core techniques for adaptation of the drilling and blasting parameters

Категория приемов	Технический прием	Краткое содержание приема	Влияние на параметры импульса взрыва *	Требуемые исходные данные для применения	Ожидаемый технологический эффект
Приемы управления параметрами заряда ВВ	Рассредоточение заряда ВВ (изменение конструкции заряда)	Разделение сплошного заряда ВВ на отдельные сегменты с воздушными или инертными промежутками	P_0 снижается на 15–30%; t увеличивается на 20–35%	Углы падения и раскрытия трещин, коэффициент крепости пород, литологическая неоднородность по глубине скважины	Оптимизация распределения энергии взрыва, снижение удельного расхода ВВ, уменьшение степени переизмельчения
	Заряжание в рукава (изменение конструкции заряда)	Размещение ВВ в гибких герметичных оболочках (рукавах), демпфирующих ударное воздействие на стенки скважины	P_0 снижается на 10–25%; t увеличивается на 15–30%		Снижение пикового контактного давления, защита стенок скважины от преждевременного разрушения
	Изменение типа ВВ	Выбор ВВ с заданной скоростью детонации (высоко- или низкоскоростные) для регулирования параметров взрывного импульса	Высокоскоростные ВВ: P_0 увеличивается на 30–50%; t сокращается на 25–40% Низкоскоростные ВВ: P_0 снижается на 20–30%; t увеличивается на 20–35%	Детонационные характеристики ВВ (скорость, давление), плотность, физико-химические свойства в условиях скважины	Точное управление пиковым давлением и длительностью импульса для формирования оптимального дробящего воздействия
Приемы пространственно-временного управления взрывом	Выбор порядка инициирования промежуточных детонаторов	Изменение пространственной последовательности детонации скважинных зарядов (прямое, обратное, встречное инициирование)	P_0 снижается до 10–15%; t увеличивается до 20–25%	Структурные характеристики массива (трещиноватость), глубина и расположение скважин, детонационные характеристики ВВ	Управление направленностью и градиентом взрывного воздействия, оптимизация гранулометрического состава развала
	Выбор схемы инициирования поверхностной сети	Корректировка временных интервалов замедлений между детонацией отдельных зарядов или групп зарядов	P_0 снижается на 15–25%; t сокращается на 10–15% (при малых интервалах замедления)	Пространственная ориентировка и густота трещиноватости, требуемая степень дробления и сейсμβезопасности	Повышение эффективности дробления за счет управляемой интерференции волн, снижение уровня сейсмических колебаний
	Выбор типа системы инициирования	Применение электронных (ЭСИ) или неэлектрических (НСИ) систем инициирования, различающихся точностью временного контроля	ЭСИ: P_0 регулируется в пределах ± 5 –15%; t контролируется изменяется в пределах ± 10 –20% НСИ: P_0 изменяется в пределах ± 20 –30%; t увеличивается на 15–25%	Структурно-механические свойства и неоднородность массива, степень его водонасыщенности, требования к точности детонации	Обеспечение высокой точности и повторяемости временных параметров взрыва, повышение общей безопасности и управляемости процесса

Примечания. * Значения являются оценочными и требуют уточнения в результате опытных взрывов на сложноструктурных месторождениях ПИ; P_0 – пиковое давление взрыва, МПа; t – длительность импульса, мс.

Note. * These values are approximate and require verification through test blasting at complex-structured mineral deposits; P_0 – peak blast pressure, MPa; t – pulse duration, ms.

ния σ_1 , м/с; V_{p2} – скорость продольной волны в направлении главного растягивающего напряжения σ_3 , м/с.

Учет акустического импеданса и коэффициента k_n , отражающего анизотропию свойств массива в направлениях главных напряжений, позволяет повысить точность корректировки параметров БВР в условиях изменяющегося напряженного состояния массива. Ориентировочно, это снижает погрешность определения достаточного импульса взрыва на 10–20% по сравнению с подходами, не учитывающими пространственную неоднородность напряженно-деформированного состояния массива. Конкретная величина зависит от литолого-структурных особенностей месторождения и подлежит экспериментальному уточнению.

Если установлено отклонение проектного импульса взрыва от достаточного импульса, то приступают к подбору технических приемов или их комбинаций (в соответствии с таблицей), обеспечивающих необходимое снижение или увеличение проектного импульса взрыва до уровня достаточного значения. Корректировка обеспечивается применением соответствующих технических приемов.

Заключение

В представленной работе на основе фундаментальных положений зонной теории взрыва (В.Н. Родионов, В.В. Адушкин и др.) и теории импульса взрыва скважинного заряда (Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, В.М. Кузнецов и др.) разработана и формализована структурная схема поэтапной адаптации параметров буровзрывных работ для условий сложноструктурных месторождений.

Основные научно-практические результаты исследования заключаются в следующем:

1. Разработана классификация технических приемов адаптации БВР, систематизированная по двум груп-

пам: управление параметрами заряда ВВ и пространственно-временное управление группой зарядов ВВ. Для каждого приема оценено влияние на пиковое давление и длительность импульса взрыва, что позволяет целенаправленно корректировать взрывное воздействие.

2. Предложен подход к учету напряженного состояния массива через акустический импеданс горной породы, что позволяет косвенно оценивать действующие механические напряжения и учитывать их при выборе рациональных параметров БВР. Введен коэффициент повышения скорости продольных волн, отражающий анизотропию свойств массива горных пород в направлениях главных напряжений.

В отличие от традиционных статических методов, предложенная адаптивная схема позволит: повысить эффективность использования материальных ресурсов; снизить сейсмическое воздействие, разлет кусков горной массы; минимизировать выход негабарита и повысить качество дробления; обеспечить безопасность и эффективность горных работ в сложных горно-геологических условиях.

Предложенный подход к адаптивному управлению не требует мгновенных крупных капиталовложений. Методология позволяет начинать внедрение с использования существующих на предприятии данных и оборудования (параметры бурения, геологическая документация, портативные средства контроля), поэтапно наращивая степень автоматизации по мере развития его цифровой инфраструктуры.

Реализация предложенного подхода будет способствовать технологическому развитию горнодобывающей отрасли, обеспечивая ее переход к более гибким, безопасным и ресурсоэффективным методам ведения взрывных работ.

Список литературы / References

1. Кузнецов В.М. *Математические модели взрывного дела*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние; 1977. 262 с.
2. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н., Николаевский В.Н., Ромашов А.Н., Цветков В.М. *Механический эффект подземного взрыва*. М.: Недра; 1971. 224 с.
3. Покровский Г.И., Федоров И.С. *Действие удара и взрыва в деформируемых средах*. М.: Промстройиздат; 1957. 276 с.
4. Ефремов Э.И., Кравцов В.С., Мячина Н.И., Родак С.И., Шеленок В.В., Никифорова В.А. *Основы теории и методы взрывного дробления горных пород*. Киев: Наукова думка; 1979. 224 с.
5. Кутузов Б.Н., Ильин А.М., Умнов А.Е. и др. *Безопасность взрывных работ в промышленности*. М.: Недра; 1992. 544 с.
6. Кузнецов В.А. *Обоснование технологии буровзрывных работ в карьерах и открытых горно-строительных выработках на основе деформационного зонирования взрываеваемых уступов* [автореф. дис. ... д-ра техн. наук]. М.; 2010. 43 с.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. 3-е изд., испр. М.: Физматлит; 2008. 652 с.
8. Власов О.Е. *Основы динамики взрыва*. М.: ВИА; 1945. 350 с.
9. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. *Физика взрыва*. М.: Физматиздат; 1959. 800 с.
10. Ханукаев А.Н. *Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом*. М.: Госгортехиздат; 1962. 200 с.
11. Сенук В.М. Импульс взрыва и условия более полного использования его на дробление массивов крепких пород при скважинной отбойке. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1979;(1):28–34. Senuk V.M. The impulse from an explosion, and conditions for its greater utilization in crushing hard rock masses in blasting. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1979;(1):28–34. (In Russ.)

12. Горинов С.А., Маслов И.Ю. Оценка величины эффективного импульса при взрыве цилиндрического заряда. *Проблемы недропользования*. 2022;(3):5–13. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.005>
Gorinov S.A., Maslov I.Yu. Estimation of the magnitude of the effective impulse during the explosion of a cylindrical charge. *Problems of Subsoil Use*. 2022;(3):5–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.005>
13. 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. *Journal of Mining Science*. 2025;61(3):401–411. <https://doi.org/10.1134/S106273912503007X>
14. Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Аспекты практической реализации метода адаптации параметров буровзрывных работ в условиях сложноструктурных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025;(4):46–56. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20250405>
Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. Implementation of the blast design and pattern adaptation method at structurally complex deposit. *Journal of Mining Science*. 2025;61(4):564–572. <https://doi.org/10.1134/S1062739125040052>
15. Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Методика измерения детонационных характеристик эмульсионных ВВ и экспресс-определения прочностных свойств горных пород. *Горная промышленность*. 2024;(5):37–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-37-44>
Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. The method of measuring the detonation characteristics of emulsion explosives and express determination of the strength properties of rocks. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):37–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-37-44>
16. Галимьянов Ал.А., Черских О.И., Рассказова А.В., Белоцерковский Д.А., Галимьянов Анд.А. Методика обеспечения качества заряда наливного эмульсионного взрывчатого вещества в обводненных скважинах. *Уголь*. 2024;(1):100–108. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-100-108>
Galimyanov Al.A., Cherskih O.I., Rasskazova A.V., Belotserkovsky D.A., Galimyanov And.A. Methodology of assurance of charge quality for emulsion explosive in water wells. *Ugol'*. 2024;(1):100–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-100-108>
17. Зубков А.В. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: УрО РАН; 2001. 335 с.

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: 02.03.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 16.04.2026

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: 02.03.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 16.04.2026