



Выбор оптимальных интервалов замедления для снижения сейсмического воздействия на борт разреза

С.Т. Соколов¹ ✉, В.В. Пронин², И.В. Шмонин³, А.А. Фардзинов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ООО «КРУ-Взрывпром», г. Кемерово, Российская Федерация

³ АО «УК «Кузбассразрезуголь», г. Кемерово, Российская Федерация

✉ Sokolov_ST@pers.spmi.ru

Резюме: В статье рассмотрено влияние разновременных интервалов при короткозамедленном взрывании с применением программируемых электронных детонаторов для определения минимального сейсмического воздействия на борт разреза. Экспериментальный взрывной блок простой геометрической формы, расположенный на Кедровском угольном разрезе, состоял из 406 скважин и был разбит на четыре сектора с интервалами замедлений: 176 (I), 109 (II), 67 (III) и 42 мс (IV). На основе зависимости академика М.А. Садовского и полученных фактических скоростей смещения по трем компонентам выполнен детальный анализ затухания векторной скорости для каждого сектора, определены коэффициент сейсмичности K и показатель затухания n , оценена достоверность аппроксимации R_2 . Для более точной интерпретации результатов эксперимента предложен показатель приращения затухания амплитуды a_i , рассчитанный на основании отношения пиковых скоростей и отношения приведенных расстояний от фактической группы скважин до измерительной аппаратуры. По совокупности a_i для каждого интервала замедления определено среднее значение $a_{ср}$. Показано, что интервал замедления 176 мс приводит к значительной интерференции сейсмических волн, что негативно сказывается на показателе затухания. При интервале 109 мс наблюдается высокий K , а интервал 42 мс имеет низкий K , но меньшую долю положительных затуханий и значительные пиковые скорости колебаний. Интервал 67 мс занимает сбалансированное положение: минимальный K при высокой доле затуханий (80%), что делает его предпочтительным для практического применения в условиях конкретного предприятия.

Ключевые слова: устойчивость бортов, сейсмическое воздействие, векторная скорость, коэффициент сейсмичности, коэффициент затухания, короткозамедленное взрывание

Благодарности: Исследования проведены в рамках мероприятия №1 Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. №1144-р

Для цитирования: Соколов С.Т., Пронин В.В., Шмонин И.В., Фардзинов А.А. Выбор оптимальных интервалов замедления для снижения сейсмического воздействия на борт разреза. *Горная промышленность*. 2026;(4S):77–84. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-77-84>

Selection of optimal deceleration intervals to reduce seismic impact on the strip mine wall

S.T. Sokolov¹ ✉, V.V. Pronin², I.V. Shmonin³, A.A. Fardzinov¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² KRU-Vzryvprom LLC, Kemerovo, Russian Federation

³ JSC UK Kuzbassrazrezugol, Kemerovo, Russian Federation

✉ Sokolov_ST@pers.spmi.ru

Abstract: The paper discusses the effect of different time intervals in short-delay blasting using programmable electronic detonators to determine the minimum seismic impact on the strip mine wall. A test blast block of a simple geometric shape located at the Kedrovsky coal strip mine, consisted of 406 blast holes and was divided into four sectors with the delay intervals of 176 (I), 109 (II), 67 (III), and 42 ms (IV). Based on the dependence of Academician M.A. Sadovsky and the actual displacement velocities obtained in three components, a detailed analysis of the vector velocity attenuation for each sector was performed, the seismicity coefficient K and the attenuation index n were determined, and the accuracy of the approximation R_2 was evaluated. An index of the amplitude attenuation increment a_i was proposed to more accurately interpret the experimental results. This index is calculated based on the ratio of the peak velocities and the ratio of the reduced distances from the actual group of blast holes to the measuring equipment. The average value of a_i was determined for each interval of slowdown. It is shown that



a 176 ms slowdown interval leads to significant interference of seismic waves, which negatively affects the attenuation rate. The 109 ms interval results in a high K value, while a 42 ms interval is characterized with a low K value, but a lower proportion of the positive attenuations and significant peak oscillation velocities. The 67 ms interval strikes a balance between a minimal K value and a high proportion of attenuations (80%), making it preferable for practical applications in a specific enterprise.

Keywords: pit wall stability, seismic effect, vector velocity, seismic coefficient, attenuation coefficient, short-delay blasting

Acknowledgements: The research was carried out as part of Activity No.1 of the Comprehensive Scientific and Technical Programme for the Complete Innovation Cycle, approved by Order No.1144-r of the Government of the Russian Federation dated 11 May 2022.

For citation: Sokolov S.T., Pronin V.V., Shmonin I.V., Fardzinov A.A. Selection of optimal deceleration intervals to reduce seismic impact on the strip mine wall. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):77–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-77-84>

Введение

Технологии ведения открытых горных работ зачастую связаны с применением буровзрывного способа для дробления пород различной крепости [1–3]. Использование взрывчатых веществ позволяет значительно сократить трудозатраты и повысить эффективность добычи полезных ископаемых [3–5]. Вместе с тем подготовка и проведение взрывных работ влекут за собой негативные последствия, такие как разлет осколков взорванной горной массы, ударно-воздушные волны, выбросы ядовитых газов и сейсмическое воздействие [6]. Большинство перечисленных факторов оказывают влияние локально или кратковременно: фронт ударно-воздушной волны быстро рассеивается ввиду низкой плотности воздуха и действует в основном на застекление и хрупкие объекты [7], расположенные вблизи эпицентра взрыва; разлет осколков представляет единоразовую опасность [8]; ядовитые газы быстро перемешиваются с атмосферным воздухом, что снижает их уровень до пределов ПДК менее чем за 30 мин [9; 10].

Совершенно иначе ведут себя сейсмические волны [11–13], вызываемые взрывными работами. Распространяясь в массиве горных пород, они оказывают свое воздействие не только на технические сооружения предприятия. По пути своего следования сейсмические волны деформируют сам объект, по которому распространяются, и, если это воздействие будет превышать упругие деформации, такой эффект будет накапливаться, что повлечет за собой снижение устойчивости бортов карьера [14–16], повышение общей трещиноватости массива и впоследствии может привести к значительным нарушениям в работе горного предприятия.

Одним из наиболее эффективных способов для снижения сейсмического воздействия является применение короткозамедленного взрывания (КЗВ), принцип работы которого заключается в снижении массы единовременного заряда [17–19].

Согласно пункту №794 ФНиП №494 определяет безопасное сейсмическое расстояние до зданий и сооружений, в которых после производства взрывных работ предполагается отсутствие повреждений, нарушающих нормальное функционирование охраняемого объекта. Борты карьера не рассматриваются в нормативных документах, хотя в действительности со временем теряют свою устойчивость после многократного сейсмического воздействия. Раскрытие естественных трещин в массиве приводит к повышению вероятности обрушения пробуриваемых скважин

на новых блоках, либо к частичному осыпанию рабочего борта, что увеличит линию наименьшего сопротивления и вызовет сложности при проектировании первого ряда скважин [20; 21].

Уменьшить сейсмическое воздействие можно при снижении массы единовременно взрывающегося заряда. Однако оптимальное качество дробления горной массы обеспечивается правильно подобранным удельным расходом взрывчатого вещества [22; 23].

Вторым и наиболее подходящим способом снижения сейсмического воздействия на объекты является подбор оптимальных ступеней замедления между группами зарядов. При КЗВ суммарная масса ВВ остаётся неизменной, но разбивается на группы с такими интервалами замедления, которые позволяют сохранить удельный расход, одновременно снижая пиковую сейсмическую нагрузку. Такой подход требует тщательного анализа сейсмического воздействия и проведения натурных экспериментальных взрывов с целью выявления наиболее применимых интервалов КЗВ для конкретного горного производства.

В настоящей работе приведен анализ массового взрыва на Кедровском угольном разрезе, выполненного с применением программируемых электронных детонаторов, с целью экспериментально определить интервал замедления между группами скважинных зарядов, обеспечивающий минимальное сейсмическое воздействие на борт разреза при сохранении эффективности дробления.

Материалы и методы

Согласно исследованиям, проведенным Горным бюро США, именно скорость сейсмических колебаний имеет наилучшую корреляцию между параметрами буровзрывных работ и воздействием на охраняемый объект. Метод прогнозирования скорости смещения, принятый как стандарт в разных странах, основан на расчете нормированного расстояния (НР-моделирование) [24; 25]. Такой подход основывается на мнении, что пиковая скорость колебания частиц грунта в сейсмозврывной волне является функцией расстояния, отнесенного к массе заряда взрывчатого вещества [26–28].

Именно такой подход предложил академик М.А. Садовский [29; 30]:

$$v = K \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-n}, \quad (1)$$

где v – скорость колебания частиц грунта, см/с; R – расстояние от центра взрыва до точки измерения, м; Q – максимальная масса взрывчатого вещества в ступени замедления, кг; K – коэффициент сейсмичности; n – показатель затухания.

Распространяясь по массиву, сейсмическая волна заставляет частицы колебаться во всех плоскостях, таким образом, инструментальной оценкой скорости колебаний в уравнении (1) служит максимальное значение модуля полного вектора смещения в единицу времени t :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad (2)$$

где v_z^2 – вертикальная компонента скорости смещения, см/с; v_x^2 – продольная компонента скорости смещения, см/с; v_y^2 – перпендикулярная компонента скорости смещения, см/с.

Известно, что продольная скорость в упругих средах распространяется быстрее поперечных скоростей [31; 32], поэтому рассмотрение векторной скорости в момент времени t дает понимание о фактических колебаниях.

Коэффициент сейсмичности K и показатель затухания n являются взаимосвязанными величинами и напрямую зависят от условий взрывания и геологических условий [33; 34] свойств горного массива, типов ВВ, диаметра скважин, длины заряда, а также интервала замедления между группами зарядов.

Если рассматривать массовый взрыв с применением КЗВ как множество источников колебаний, то для каждой группы формируется своя сейсмическая волна со своими значениями K и n . Её амплитуда и скорость затухания с расстоянием определяются интерференцией волн от соседних групп. При выборе неоптимального замедления волны могут накладываться в фазе (усиление) или вызывать резонансные эффекты в массиве.

Определить коэффициент сейсмичности и показателя степени затухания можно на основе регрессионного анализа реальных векторных скоростей. В случае реального взрыва необходимы как минимум две точки регистрации [6; 35].

Для каждой группы зарядов, взорванной с фиксированным интервалом замедления, из экспериментальных данных необходимо получить следующие величины: Q_i – масса ВВ в i -й группе, кг; r_i – расстояние от центра i -й группы до точки регистрации, м; $v_{\text{век},i}$ – максимальная векторная скорость колебаний, зарегистрированная в момент взрыва i -й группы, мм/с.

Для каждой группы рассчитывается приведённое расстояние:

$$R_{\text{пр},i} = \frac{r_i}{\sqrt[3]{Q_i}}. \quad (3)$$

Зависимость (1) аппроксимируется степенной функцией, и для применения линейного регрессионного анализа необходимо выполнить логарифмирование обеих частей функции:

$$\ln(v_{\text{век}}) = \ln(K) - n \cdot \ln(R_{\text{пр}}). \quad (4)$$

Результаты и их обсуждение

Для определения оптимального замедления между группами зарядов при массовых взрывах вскрышных пород Кедровского угольного разреза был проведен масштабный

экспериментальный взрыв. С учетом необходимых для исследования параметров был выбран блок простой геометрической формы, расположенный на горизонте +175, размерами 300×96 м. С сеткой скважин 8,5×8,5 м, сгущение сетки до размеров 6,0×8,5 и 4,0×8,5 м осуществлялось по первому ряду, второе сгущение 4,5×8,5 м по центру блока в месте явного тектонического нарушения вдоль основной системы трещин. Всего взорвано 406 скважин. Скважинные заряды подобраны согласно типовому проекту предприятия, диаметр 229 мм высота уступа 15 м, глубина скважин в связи с рельефом изменялась от 13 до 18 м, вес зарядов в скважинах варьировался от 300 до 460 кг. Используемое взрывчатое вещество – Гранулит МК на основе пористой аммиачной селитры, для патронов-боевиков использовались Нитронит П марка С-60 весом 0,8 кг и программируемые электронные детонаторы Нефрит-1. Длина заряда 13-метровой скважины составляла 6,2 м, для 18-метровой скважины – 13,6 м. Свободная от заряда часть скважины заполнялась забойкой (щебнем и буровым шламом) до устья. При проведении опытно-промышленных испытаний для оценки сейсмического воздействия на борт разреза принято следующее решение: объединить скважинные заряды в группы таким образом, чтобы приблизить массу заряда к максимально допустимой массе единовременно взрывающегося заряда в условиях Кедровского разреза. В результате в одну группу попали максимум 5 скважин. Объединённые в одну группу заряды программировались на одинаковое время замедления. Взрывной блок был разбит на четыре сектора, в каждом секторе между группами были выбраны следующие интервалы замедлений: 176 (I), 109 (II), 67 (III) и 42 мс (IV), общее число групп – 102. Схема инициирования выбрана диагональная. Схематично сектора и точки расположения датчиков представлены на рис. 1, описание секторов приведено в табл. 1.

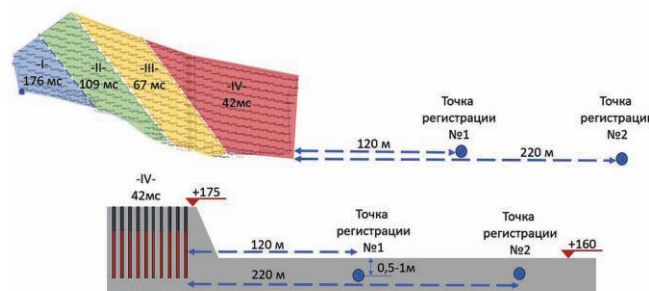


Рис. 1
Расположение датчиков
относительно взрывного блока

Fig. 1
Location of the sensors
relative to the blast lock

Сейсмостанции (Zet – 7152 N и Zet 048 – C) располагались в двух точках наблюдения непосредственно у бровки нижележащего уступа, горизонт +160. Расстояние между датчиками составило 100 м, а от крайней скважины блока 120 и 220 м соответственно.

В результате измерений сейсмических колебаний при взрыве экспериментального блока получены велосигرامы по трем компонентам (X , Y , Z). Частота дискретизации приборов 2,50 кГц, что позволило фиксировать колебания с интервалом 0,4 мс. На рис. 2 представлены синхронизированные суммарные скорости, полученные путем векторного сложения по формуле (3), суммарная пиковая скорость, зафиксированная первым прибором, достигает 37 мм/с, а на расстоянии 220 м от блока 22 мм/с.



Таблица 1
Информация по группам скважинных зарядов

Номер сектора	Интервал между группами внутри сектора, мс	Количество групп, шт.	Количество скважин в группе, шт.	Максимальный вес заряда в группе, кг
I	176	13	4	1800
II	109	20	4	1830
III	67	28	4	1830
IV	42	41	5	2034

Table 1
Information on the blast hole charge groups

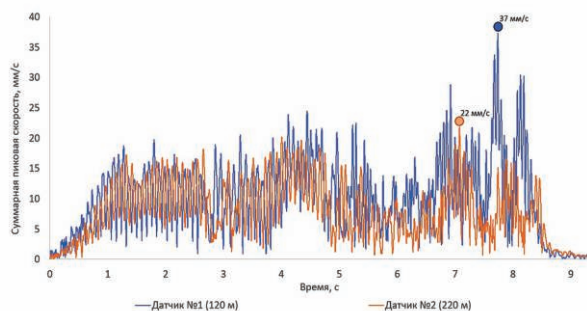


Рис. 2
Суммарная пиковая скорость

Fig. 2
The total peak velocity

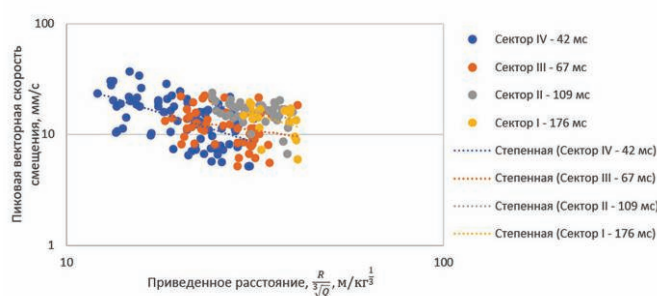


Рис. 4
Результаты регрессионного анализа секторов согласно стандартной методике

Fig. 4
Results of the regression analysis of the sectors according to the standard method

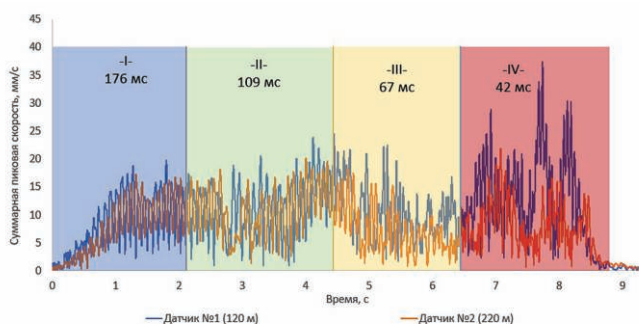


Рис. 3
Пиковые скорости смещения в рассматриваемых секторах

Fig. 3
Peak displacement velocities in the sectors under consideration

При более детальном разборе в IV секторе наблюдается четкое снижение амплитуды колебаний с увеличением расстояния, это объясняется более близким расположением сектора к измерительной аппаратуре, а значит более выраженным относительным расстоянием. При этом в других секторах наблюдаются аномалии, в частности, в I секторе суммарная пиковая скорость практически не затухает с увеличением расстояния, а в некоторых моментах амплитуды колебаний, зарегистрированные вторым датчиком, превышают значения первого. На стыке II и III секторов наблюдается всплеск колебаний, также в III секторе зафиксированы минимальные амплитуды колебаний (рис. 3).

Для подтверждения наблюдений был выполнен регрессионный анализ каждой группы по отдельности. По дан-

ным проекта на бурение и .xml файлам, полученным от маркшейдерской службы Кедровского угольного разреза, была отстроена цифровая копия экспериментального блока, в строгом соответствии с проектом осуществлены зарядка и монтаж скважин. Синхронизированы амплитуды колебаний и серии скважинных зарядов. Сопоставлены приведенные расстояния к каждой отдельной группе скважин с пиковой амплитудой колебаний в момент времени t .

После обработки для каждого сейсмического события (взрыва группы скважинных зарядов) были получены следующие значения: V_1 – векторная скорость на датчике №1, мм/с; V_2 – векторная скорость на датчике №2, мм/с; R_1 – расстояние от центра группы до датчика №1, м; R_2 – расстояние от центра группы до датчика №2, м; Q – масса ВВ в группе, кг.

На рис. 4 отображен регрессионный анализ по секторам, наблюдается значительный разброс точек, это связано с явной интерференцией сейсмических волн.

По результатам регрессионного анализа секторов I–IV не наблюдается четкой достоверности аппроксимации (R_2 для каждого сектора $< 0,8$), это связано с несколькими причинами:

1. Интерференция волн от различных групп зарядов вносит значительный вклад в амплитудные колебания (классическая формула М.А. Садовского описывает затухание единичного сферического заряда).

2. Сложная схема монтажа блока (группы взрывааемых зарядов в одном секторе перемещаются относительно точек наблюдения).

Таблица 2
Результат регрессионного анализа

Номер сектора	Интервал между группами внутри сектора, мс	Коэффициент сейсмичности K	Показатель затухания n	Достоверность аппроксимации R_2 / после выборки 3σ
I	176	339	0,90	0,12 / (0,37)
II	109	138	0,63	0,17 / (0,56)
III	67	58	0,48	0,05 / (0,63)
IV	42	335	1,065	0,33 / (0,59)

Table 2
Regression analysis results



Таблица 3
Результаты анализа по попарному сопоставлению пиковых амплитуд

Table 3
Results of the analysis based on pairwise comparison of the peak amplitudes

Номер сектора	Интервал между группами внутри сектора, мс	Средний Коэффициент сейсмичности K	Средний показатель приращения затухания амплитуды a_{cp}	Доля положительных показателей приращения затухания амплитуды $a_i > 0$, %
I	176	495	0,96	33
II	109	594	1,00	53
III	67	268	0,46	80
IV	42	316	0,44	75

3. Массы зарядов также имеют расхождения в некоторых группах.

Более корректным в таком случае методом оценки является попарный анализ пиковых скоростей. Показатель приращения затухания амплитуды a_i – безразмерный показатель, характеризующий интенсивность затухания сейсмической волны от i -й группы зарядов при её распространении между двумя точками наблюдения с известными расстояниями до источника колебаний. Положительные значения a_i соответствуют затуханию волны, отрицательные – аномальному усилению.

В отличие от классического показателя затухания n в формуле Садовского (который получается из регрессии по всему массиву данных), a_i относится к одному событию и учитывает реальное приращение расстояния между датчиками и взрывными скважинами. Это позволяет оценивать стабильность затухания внутри одного интервала замедления. Расчет показателя затухания каждого события производился по формуле:

$$a_i = \frac{\ln(V_{1i}/V_{2i})}{\ln(R_{2i}/R_{1i})}. \quad (5)$$

Выбор натурального логарифма в выражении (5) обусловлен степенным характером затухания сейсмических волн. В свою очередь, логарифмирование выражения по основанию e позволяет представить функцию линейно, для определения показателя затухания устраняя влияние масштабного эффекта.

По совокупности a_i для каждого интервала замедления определено среднее значение a_{cp} .

Таким образом, коэффициент сейсмичности K после расчёта a_i для каждого события в пределах одного интервала замедления определяется из уравнения Садовского, записанного для каждого датчика отдельно.

В каждом секторе вместо коэффициента сейсмичности подставлялся средний показатель приращения затухания a_{cp} :

$$\ln(V_1) = \ln(K) - a_{cp} \cdot \ln(R_{np1}); \quad (6)$$

$$\ln(V_2) = \ln(K) - a_{cp} \cdot \ln(R_{np2}). \quad (7)$$

Таким образом, при интервале 109 мс наблюдается высокий коэффициент сейсмичности ($K = 594$), что указывает на значительную энергию, передаваемую массиву. Интервал 42 мс, напротив, имеет низкий коэффициент сейсмичности ($K = 316$), но меньшую долю положительных затуханий (75%) и значительные пиковые скорости колебаний. Интервал 67 мс занимает промежуточное, но наиболее сбалансированное положение: минимальный коэффициент сейсмичности ($K = 268$) при высокой доле затуханий (80%), что делает его предпочтительным для практического применения.

Выводы

Установлено, что интервал замедления в 176 мс между группами зарядов в условиях Кедровского угольного разреза приводит к значительной интерференции сейсмических волн, что негативно сказывается на показателе затухания. Интервалы в 42 и 67 мс между группами зарядов показали идентичную долю затуханий – 75 и 80% соответственно, однако в случае 42 мс зафиксировано повышение пиковой скорости смещения, что ограничивает применение таких интервалов вблизи охраняемых объектов. По совокупности критериев минимальному коэффициенту сейсмичности ($K = 268$) и максимальной доле положительного показателя приращения ($a_i > 0$ в 80%) интервал замедлений в 67 мс между группами зарядов выглядит наиболее предпочтительным для минимизации сейсмического воздействия на борт разреза. Предложенный показатель приращения затуханий a_i позволяет более корректно оценить затухание сейсмической волны при применении КЗВ, однако для повышения надежности анализа рекомендуется установка третьей точки регистрации на расстояниях ~170 м от крайней скважины, это позволит разделить вклад интерференции волн и геометрического расхождения.

Вклад авторов

С.Т. Соколов – разработка программы экспериментов, интерпретация данных, получение регрессионных зависимостей.

В.В. Пронин – сопровождение экспериментальных работ.

И.В. Шмонин – организация экспериментальных исследований на производственном объекте.

А.А. Фардзинов – обработка экспериментальных данных, автоматизация процессов анализа.

Author's Contribution

Semen T. Sokolov – design of the test programme, data interpretation, derivation of the regression relationships

Viktor V. Pronin – supervision of the test work

Ivan V. Shmonin – organization of test studies at the production site

Artem A. Fardzinov – processing of test data, automation of the analysis processes



Список литературы / References

1. Маринина О.А. Методический подход к экономической оценке потерь балансовых запасов угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(11-1):183–197. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/183.pdf> (дата обращения: 08.04.2026).
Marinina O.A. Methodological approach to economic assessment of losses of balance coal reserves. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(11-1):183–197. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/183.pdf> (accessed: 08.04.2026).
2. Поспехов Г.Б., Кутепов Ю.Ю., Кондакова В.Н. Мониторинг гидрогеомеханических процессов при складировании в отвал отходов углеобогащения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(2):99–113. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_2_0_99
Pospehov G.B., Kutevov Yu.Yu., Kondakova V.N. Monitoring of hydro-geomechanical processes in piling coal preparation refuse. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(2):99–113. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_2_0_99
3. Белин В.А., Комащенко В.И., Воронец А.А. Современное состояние взрывной отбойки горных пород на карьерах России. *Безопасность труда в промышленности*. 2015;(8):68–74.
Belin V.A., Komashchenko V.I., Voronets A.A. . The current state of rock blasting in Russian open-pit mines. *Occupational Safety in Industry*. 2015;(8):68–74. (In Russ.)
4. Ковалевский В.Н., Мысин А.В., Сушкова В.И. Теоретические аспекты технологии взрывной отбойки блочного камня. *Горные науки и технологии*. 2024;9(2):97–104. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-187>
Kovalevsky V.N., Mysyn A.V., Sushkova V.I. Theoretical aspects of block stone blasting method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):97–104. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-187>
5. Комащенко В.И., Голик В.И., Белин В.А., Гапоненко А.Л. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьерах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(9):293–304. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2014/09/47_Komashenko.pdf (дата обращения: 08.04.2026).
Komashchenko V.I., Golik V.I., Belin V.A., Gaponenko A.L. Enhanced efficiency of blasting by new methods of borehole charge initiation in open-pit mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(9):293–304. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2014/09/47_Komashenko.pdf (accessed: 08.04.2026).
6. Белин В.А., Холодилов А.Н., Господариков А.П. Методические основы прогнозирования сейсмического действия массовых взрывов. *Горный журнал*. 2017;(2):66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.12>
Belin V.A., Kholodilov A.N., Gospodarikov A.P. Methodical principles of prediction of seismic effect due to large-scale blasting. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(2):66–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.12>
7. Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований. В кн.: *Физика взрыва: Сборник №1 научно-исследовательских работ в области физики взрыва*. М.: Изд-во АН СССР; 1952. С. 20–23. Режим доступа: https://elbib.biblioatom.ru/text/fizika-vzryva_1_1952/p20/ (дата обращения: 08.04.2026).
8. Маринин М.А., Илюхин Д.А., Рахманов Р.А., Аленичев И.А. Оценка параметров сброса взорванной горной массы в выработанное пространство карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(1):66–79. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_66
Marinin M.A., Ilyukhin D.A., Rakhmanov R.A., Alenichev I.A. Parameters of blast throw of rocks to mined-out void of open pit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(1):66–79. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_66
9. Виноградов Ю.И., Сергиенко Н.Н., Васильев Т.В., Песьяков А.В. Перспективы применения патронированных газогенераторов на основе хлората натрия в горном деле и строительстве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(7):131–145. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_131
Vingradov Yu.I., Sergienko N.N., Vasilyev T.V., Pesyakov A.V. Application prospects of cartridge-type sodium chlorate gas generators in mining and construction. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(7):131–145. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_131
10. Гендлер С.Г., Василенко Т.А., Степанцова А.Ю. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):135–148. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_1_135
Gendler S.G., Vasilenko T.A., Stepantsova A.Yu. Investigation of mass transfer of hard coal during its transportation to the place of temporary storage. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):135–148. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_1_135
11. Афанасьев П.И., Павлович А.А., Мельников Н.Я., Николаев Р.В. Особенности распространения сейсмических волн в скальных прибортовых массивах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(1-1):17–32. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/1/1-1-2025-17-32.pdf> (дата обращения: 08.04.2026).
Afanasev P.I., Pavlovich A.A., Melnikov N.Ya., Nikolaev R.V. Features of seismic explosive wave propagation in hard adjacent rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(1-1):17–32. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/1/1-1-2025-17-32.pdf> (accessed: 08.04.2026).
12. Афанасьев П.И., Ахметов А.Р., Фадеев А.А., Шмонин И.В. Прогнозирование сейсмического воздействия от промышленных взрывов с учетом энергетических характеристик взрывчатых веществ в условиях Кедровского угольного разреза. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(2-1):5–18. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_5-18.pdf (дата обращения: 28.04.2026).
Afanasev P.I., Akhmetov A.R., Fadeev A.A., Shmonin I.V. A seismic impact forecasting methodology for production blasts at the Kedrovsky coal mine based on explosives energy properties. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(2-1):5–18. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_5-18.pdf (accessed: 28.04.2026).



13. Конури́н А.И., Орлов Д.В. Комплексный подход к прогнозированию сейсмической активности в горных выработках: интеграция временных рядов и нейронных сетей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(10):140–152. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_10_0_140
Konurin A. I., Orlov D. V. Integrated approach to mine seismicity prediction: Integration of time series and neural networks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(10):140–152. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_10_0_140
14. Супрун В.И., Зеленин Д.П., Казаков В.А. Основные структурные факторы, определяющие устойчивость бортов угольных карьеров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12):52–69. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12/12_2025_52-69.pdf (дата обращения: 28.04.2026).
Suprun V.I., Zelenin D.P., Kazakov V.A. Basic structural factors of pit wall stability in open-pit coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12):52–69. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12/12_2025_52-69.pdf (accessed: 28.04.2026).
15. Господариков А.П., Выходцев Я.Н., Зацепин М.А. Математическое моделирование воздействия сейсмических волн на горный массив, включающий выработку. *Записки Горного института*. 2017;226:405–411. <https://doi.org/10.25515/pmi.2017.4.405>
Gospodarikov A.P., Vykhodtsev Y.N., Zatsepin M.A. Mathematical modeling of seismic explosion waves impact on rock mass with a working. *Journal of Mining Institute*. 2017;226:405–411. <https://doi.org/10.25515/pmi.2017.4.405>
16. Егизбаев М.К., Выходцев В.Л., Артемов В.А., Виноградова Е.Ю., Щербич С.В. Сейсмическое воздействие взрыва на инженерные сооружения и массив горных пород. *Записки Горного института*. 2007;171:185–188. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7688> (дата обращения: 28.04.2026).
Egizbaev M.K., Vykhodtsev V.L., Artemov V.A., Vinogradova E.Y., Shcherbich S.V. Seismic impact of explosion on engineering structures and rock massive. *Journal of Mining Institute*. 2007;171:185–188. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7688> (accessed: 28.04.2026).
17. Adhikari G.R., Jain N.K., Roy S., Theresraj A.I., Balachander R., Venkatesh H.S., Gupta R.N. Control measures for ground vibration induced by blasting at coal mines and assessment of damage to surface structures. *Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology*. 2006;12(1):3–19. Available at: <https://www.isrmtt.com/wp-content/uploads/pdf/Folders/Volume-12No-1January2006/adhikari.pdf> (accessed: 28.04.2026).
18. Babyr N.V., Kuziev D.A., Szankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).
19. Hudaverdi T., Akyildiz O. An alternative approach to predict human response to blast induced ground vibration. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2021;20(1):257–273. <https://doi.org/10.1007/s11803-021-2018-7>
20. Ишейский В.А., Рядинский Д.Э., Магомедов Г.С. Расчет линии наименьшего сопротивления по первому ряду скважин при взрывании сложноструктурных массивов на основе учета радиусов зон трещинообразования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(3):64–79. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_3_0_64
Isheisky V. A., Ryadinskii D. E., Magomedov G. S. Calculation of burden by the first row of blastholes in complex-structure rock mass blasting with regard to cracked zone radii. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(3):64–79. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_3_0_64
21. Некрасов А.В., Ческидов В.В., Некрасова А.Ю. Анализ зависимостей смещения горной массы от применяемых параметров буровзрывных работ и геологических характеристик горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(1):80–99. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_80
Nekrasov A.V., Cheskidov V.V., Nekrasova A.Y. Analysis of displacements as function of drilling and blasting parameters and geological characteristics of rocks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(1):80–99. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_1_0_80
22. Хохлов С.В. Применение методов цифрового моделирования для прогнозирования параметров развала взорванной горной массы. *Записки Горного института*. 2025;275:196–204. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16650> (дата обращения: 11.04.2026).
Khokhlov S.V. Application of digital simulation methods for predicting parameters of blasted rock muckpile. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:196–204. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16650> (accessed: 11.04.2026).
23. Сауби О., Джамисола-младший Р.С., Сугло Р.С., Мацебе О. Оптимизация взрывного дробления горных пород с использованием гибридных методов искусственного интеллекта на алмазном руднике Орапа (Ботсвана). *Записки Горного института*. 2025;275:179–195. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16592> (дата обращения: 11.04.2026).
Saubi O., Jamisola Jr. R.S., Suglo R.S., Matsebe O. Optimisation of blast-induced rock fragmentation using hybrid artificial intelligence methods at Orapa Diamond Mine (Botswana). *Journal of Mining Institute*. 2025;275:179–195. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16592> (accessed: 11.04.2026).
24. Uysal Ö., Arpaz E., Cavus M., Beyhan S., Tola Y., Yuvka S. Effect of artificial discontinuities on blast induced vibrations in open pit mines. In: Qian Q., Zhou J. (eds) *Harmonising Rock Engineering and the Environment: Proceedings of the 12th International Congress on Rock Mechanics, October 16–21, 2011, Beijing, China*. London: Taylor & Francis Group; 2012, pp. 1281–1284.
25. Singh P.K., Sirveiya A.K., Babu K.N., Roy M.P., Singh C.V. Evolution of effective charge weight per delay for prediction of ground vibrations generated from blasting in a limestone mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2006;20(1):4–19. <https://doi.org/10.1080/13895260500286050>
26. Heath D.J., Gad E.F., Wilson J.L. Blast vibration and environmental loads acting on residential structures: state-of-the-art review. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016;30(2):04015021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000750](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000750)



27. Roy M.P., Singh P.K., Singh G., Monjezi M. Influence of initiation mode of explosives in opencast blasting on ground vibration. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*. 2007;116(1):1–6. <https://doi.org/10.1179/174328607X161888>
28. Соколов С.Т., Хохлов С.В., Баженова А.В. Оценка влияния взрыва протяженного блока на охраняемый объект. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):122–134. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_122
Sokolov S. T., Khokhlov S. V., Bazhenova A. V. Design concepts for explosion products locking in chamber. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):122–134. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_122
29. Богацкий В.Ф. *Сейсмическая безопасность при взрывных работах*. М.: Недра; 1978. 128 с.
30. Садовский М.А. *Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов*. М.; Л.: Изд. и 1-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР; 1946. 29 с.
31. Shikhov A., Gogolinskii K., Kopytina D., Vinogradova A., Zubarev A. Research on acoustic properties of artificial inhomogeneities in calibration samples for ultrasonic testing of polyethylene pipe welds. *Metrology*. 2025;5(3):51. <https://doi.org/10.3390/metrology5030051>
32. Shikhov A.I., Gogolinsky K.V., Zubarev A.S., Smorodinsky Ya.G., Kopytina D.V., Vinogradova A.A. Analysis of the requirements for metrological support of methods and means of ultrasound control. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2025;61(3):280–294. <https://doi.org/10.1134/S1061830924603180>
33. Господариков А.П., Кириленко В.И., Мильков А.С., Шиленко С.Ю. Определение параметров модели руд и горных пород рудника «Заполярный» для дискретного моделирования процесса выпуска руды под обрушенными породами. *Горный журнал*. 2025;(9):13–19. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.09.02>
Gospodarikov A.P., Kirilenko V.I., Milkov A.S., Shilenko S.Yu. Model parameters of ore and rock mass in Zapolyarny Mine for discrete modeling of ore drawing under caved rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(9):13–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.09.02>
34. Захарова А.А., Войтеховский Ю.Л., Спирина А.В. Статистическая энтропия минеральных сростаний (золоторудное проявление Оленинское, Мурманская область). *Обогащение руд*. 2026;(1):30–35. <https://doi.org/10.17580/or.2026.01.05>
Zakharova A.A., Voytekhovsky Yu.L., Spirina A.V. Statistical entropy of mineral intergrowths (Oleninskoe Gold ore occurrence, Murmansk region). *Obogashchenie Rud*. 2026;(1):30–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2026.01.05>
35. Артемов В.А., Виноградов Ю.И., Холодилов А.Н., Густов С.В., Щербakov Н.Я. Исследование сейсмобезопасных условий производства массовых взрывов на руднике ОАО «Ново-Широкинский рудник». *Взрывное дело*. 2011;(105/62):239–252.
Artemov V.A., Vinogradov J.I., Kholodilov A.N., Gustov S.V., Shcherbakov N.J. Research of seismosafe conditions of production of mass explosions on JSC “Novoshirokinskoye mine”. *Explosion Technology*. 2011;(105/62):239–252. (In Russ.)

Информация об авторах

Соколов Семен Тарасович – кандидат технических наук, ассистент кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3153-7874>; e-mail: Sokolov_ST@pers.spmi.ru

Пронин Виктор Викторович – первый заместитель генерального директора, ООО «КРУ-Взрывпром», г. Кемерово, Российская Федерация

Шмонин Иван Викторович – заместитель технического директора по буровзрывным работам, АО «УК «Кузбассразрезуголь», г. Кемерово, Российская Федерация

Фардзинов Артём Аланович – аспирант кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0003-4096-5536>

Information about the authors

Semen T. Sokolov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Department of Explosives, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3153-7874>; e-mail: Sokolov_ST@pers.spmi.ru

Viktor V. Pronin – First Deputy General Director, KRU-Vzryvprom LLC, Kemerovo, Russian Federation

Ivan V. Shmonin – Deputy Technical Director for Blasting and Demolition, JSC UK Kuzbassrazrezugol, Kemerovo, Russian Federation

Artem A. Fardzinov – Postgraduate Student of the Department of Blasting, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0003-4096-5536>

Article info

Received: 29.05.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 12.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.05.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 12.08.2026