

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ С УЧЕТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ КЕДРОВСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА

П.И. Афанасьев¹, А.Р. Ахметов¹, А.А. Фадеев², И.В. Шмонин²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru

² АО «УК «Кузбассразрезуголь», Кемерово, Россия

Аннотация: Предложена методика прогнозирования сейсмического воздействия, возникающего при ведении взрывных работ на предприятиях минерально-сырьевого комплекса. Проанализированы существующие подходы к оценке локальной магнитуды: по поверхностным и объемным волнам, а также с использованием шкал Рихтера, моментной, энергетической и локальной магнитуды, изначально созданной для условий Южной Калифорнии. В основе предложенного подхода лежит регрессионный квантильный анализ, устанавливающий связь между энергией взрывающегося заряда за ступень замедления и значением локальной магнитуды. Энергия сейсмического события рассчитывалась через массу взрывчатых веществ с учетом удельной теплоты взрыва для разных типов зарядов. В ходе работы установлено, что между логарифмом энергии взрыва и локальной магнитудой существует статистически значимая линейная зависимость. Полученная регрессионная квантильная модель прошла комплексную проверку, включавшую тесты на нормальность распределения остатков, гомоскедастичность и отсутствие автокорреляции. Для повышения точности прогнозирования были рассчитаны уравнения квантильной регрессии для 10, 50 и 90% квантилей, что позволило учесть разброс данных и предложить консервативную оценку. Разработанный методический аппарат позволяет осуществлять прогноз сейсмозрывного воздействия от промышленных взрывов с необходимым уровнем надежности. Исследование вносит вклад в решение актуальной задачи обеспечения промышленной безопасности при ведении взрывных работ.

Ключевые слова: локальная магнитуда, сейсмозрывная волна, регрессионный квантильный анализ, квантиль, безопасность, Кузбасс, прогнозирование величины магнитуды.

Благодарность: 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: 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. – С. 5–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_5.

A seismic impact forecasting methodology for production blasts at the Kedrovsky coal mine based on explosives energy properties

P.I. Afanasev¹, A.R. Akhmetov¹, A.A. Fadeev², I.V. Shmonin²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru

² JSC «Coal company «Kuzbassrazrezugol», Kemerovo, Russia

Abstract: This paper proposes a methodology for predicting seismic impact generated by blasting operations at mineral resource sector enterprises. Existing approaches to local magnitude assessment are analyzed, including those based on surface and body waves, as well as the Richter scale, moment magnitude, energy magnitude, and the local magnitude scale originally developed for Southern California conditions. The proposed approach is based on quantile regression analysis, which establishes a relationship between the energy of the explosive charge per delay interval and the local magnitude value. The seismic event energy was calculated via the mass of the explosive, considering the specific heat of explosion for different charge types. The study established a statistically significant linear relationship between the logarithm of the explosion energy and the local magnitude. The developed quantile regression model underwent comprehensive verification, including tests for residual normality, homoscedasticity, and the absence of autocorrelation. To improve prediction accuracy, quantile regression equations for the 10th, 50th, and 90th percentiles were calculated, allowing for data spread consideration and enabling a conservative assessment. The developed methodological framework allows for predicting blast-induced seismic effects from industrial explosions with a required level of reliability. The research contributes to solving the urgent task of ensuring industrial safety during blasting operations.

Key words: local magnitude, blast-induced seismic wave, quantile regression analysis, quantile, safety, Kuzbass, magnitude prediction.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of Activity No. 1 of the Integrated Scientific and Technical Program of the Full Innovation Cycle, approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022, No. 1144-r.

For citation: 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. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):5-18. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_5.

Введение

Буровзрывные работы представляют собой важный этап при разработке месторождений полезных ископаемых. Они являются основным способом дробления горной массы и ведутся в различных горно-геологических условиях [1, 2]. От оптимального выбора параметров буровзрывных работ (БВР) напрямую зависит качество взорванной горной

массы [3–5]. Корректно подобранные параметры обеспечивают необходимую степень дробления горной породы, что снижает затраты на последующие процессы: экскавацию, транспортировку и переработку полезного ископаемого, уменьшает выход негабаритных кусков и обеспечивает устойчивость бортов карьера [6–8]. Вместе с тем данный метод, обладающий высокой произво-

дительностью, сопряжен с рядом негативных факторов, к числу которых относится сейсмозрывное воздействие на охраняемые здания и сооружения [9, 10].

Обеспечение сейсмозрывной безопасности и проведение мониторинга техногенной сейсмичности являются одними из важных задач при освоении месторождений полезных ископаемых, что особенно актуально для регионов с развитой горнодобывающей промышленностью, таких как Кузбасс [11 – 13]. Основной количественной характеристикой силы сейсмического события является его локальная магнитуда [14, 15]. Использование данного параметра в качестве контрольного было обусловлено результатами совещания 2017 г. – заседания координационного совета Кемеровской области по сейсмическим событиям «Активизация сейсмической активности на территории Кемеровской области». По итогам этого совещания было сформулировано предложение о контроле за сейсмическими событиями с ограничением величины локальной магнитуды величиной 3.

В настоящее время для оценки землетрясений используется несколько видов шкал магнитуд. К основным видам относят:

- магнитуда по поверхностным волнам [16, 17]:

$$M_s = \lg(A/T) + 1,66 \cdot \lg \Delta + 3,3,$$

где A – амплитуда R -волны; Δ – эпицентральное расстояние в градусах; T – период волны (обычно 20 с).

Применяется для оценки удаленных землетрясений (более 1000 км);

- магнитуда по объемным волнам [18, 19]:

$$M_b = \lg(A/T) + Q(\Delta, h),$$

где A – амплитуда P -волны; Q – поправка на расстояние и глубину; T – период волны (обычно 1 с).

Используется для анализа глубинных землетрясений;

- локальная магнитуда по Рихтеру [20, 21]:

$$M_L = \lg(A/A_0) + S,$$

где A – амплитуда волны; A_0 – нормируемая магнитуда; S – корректирующая функция, вычисляемая по таблице в зависимости от расстояния до эпицентра.

Локальная магнитуда, также известная как магнитуда Рихтера, была разработана Чарльзом Рихтером в 1935 г. специально для оценки силы землетрясений в Калифорнии [22]. Она рассчитывается на основе амплитуды сейсмических волн, записанных стандартным сейсмографом Вуда–Андерсона. Основное применение – это региональные землетрясения на расстояниях до 600 км, поскольку на больших дистанциях другие типы волн (например, поверхностные) становятся более значимыми;

- для условий Кузбасса используют стандартизированное уравнение для расчета локальной магнитуды по аналогии с геологическими условиями Южной Калифорнии [23]:

$$M_L = \lg(A) + 1,11 \cdot \lg(R) + 0,00189 \cdot R - 2,09,$$

где A – амплитуда волны в нм; R – гипоцентральное расстояние.

Она была разработана для неглубоких землетрясений (глубина обычно менее 30 км) и применяется для расстояний до 1000 км.

Шкалы магнитуд по поверхностным и объемным волнам относят к телесеismicкой зоне, расстояние до очага более 1000 км; тогда как локальные магнитуды применяются в региональной сейсмической зоне.

Кроме этого, исследователи [24, 25] используют моментную магнитуду, которая основана на сейсмическом моменте и считается наиболее универсальным способом оценки:

$$M_w = 2/3 \cdot M_0 - 10,7,$$

где сейсмический момент $M_0 = \mu \cdot \bar{u} \cdot S$; μ — модуль сдвига; u — средняя подвижка по разрыву; S — площадь разрыва. Однако в качестве недостатка следует отметить отсутствие данных о геологическом разломе.

Также применяют энергетическую шкалу в следующем виде [26, 27]:

$$\lg E = a \cdot M + b,$$

где M — магнитуда; E — энергия очага; a, b — вириальные коэффициенты. Данную формулу используют для прогнозирования магнитуды от количества взрывчатого вещества.

В связи с развитием масштаба горных работ и сближением с охраняемыми объектами актуальной задачей является исследование устойчивых связей между локальной магнитудой и энергией, выделяющейся при взрывных работах [9, 28, 29].

Целью настоящего исследования является корреляционно-регрессионный анализ связи между значениями локальной магнитуды, рассчитанными по модифицированной для Кузбасского региона шкале, и массой взрывчатых веществ с применением энергетических эквивалентов сейсмических событий. Решение этой задачи позволит разработать более точные методики прогнозирования сейсмического воздействия от промышленных взрывов [30 — 32].

Методы исследования

Для установления количественной связи между массой взрывчатых веществ (ВВ) и регистрируемым уровнем сейсмичности, характеризваемым локальной магнитудой (M_L), был проведен корреляционно-регрессионный анализ и регрессионный квантильный анализ. Исходные данные о локальной магнитуде получены от Алтае-Саянского филиала Федерального исследовательского цент-

ра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН).

При этом следует отметить, что корреляционно-регрессионный анализ методом наименьших квадратов имеет как преимущества, так и недостатки. К преимуществам следует отнести простоту в интерпретации результатов, которая позволяет находить связи как одной, так и нескольких объясняющих переменных, а также установить характер связи между переменными. К недостаткам данного метода относятся необходимость выполнения предположений о нормальности распределения, гомоскедастичности и отсутствии автокорреляции, а также меньшая устойчивость к выбросам и аномальным данным.

Статистическая значимость корреляционно-регрессионного анализа модели была проверена с помощью следующих тестов:

- тест Колмогорова–Смирнова [33, 34] осуществляет проверку нормальности распределения остатков;
- тест Бреуша–Пагана [35] осуществляет проверку постоянства дисперсии остатков (гомоскедастичности);
- тест Дарбина–Уотсона [36] осуществляет проверку отсутствия автокорреляции остатков первого порядка.

Также оценивались:

- коэффициент корреляции Пирсона — это мера линейной зависимости между двумя количественными переменными. Он принимает значения от -1 до $+1$, где $+1$ означает идеальную положительную линейную связь (при увеличении одной переменной другая всегда увеличивается), -1 — идеальную отрицательную линейную связь (при увеличении одной переменной другая всегда уменьшается), а 0 — отсутствие линейной связи;

- коэффициент детерминации — показатель, который характеризует долю дисперсии зависимой переменной, объ-

ясняемую регрессионной моделью. Для корректного применения предполагается нормальное распределение переменных и линейность связи;

- скорректированный коэффициент детерминации учитывает количество объясняющих переменных и размер выборки, предотвращая завышение качества модели при увеличении числа переменных.

В отличие от него регрессионный квантильный анализ не требует строгого соблюдения предположения о нормальности распределения, устойчив к выбросам и позволяет строить регрессионные модели для различных квантилей. Таким образом, представляется целесообразным не отказываться от классического корреляционно-регрессионного анализа, а дополнить его регрессионным квантильным анализом.

Для оценки квантильной регрессии пользовались следующими характеристиками:

- квантильный коэффициент корреляции;
- квантильный коэффициент детерминации;
- коэффициент корреляции Спирмена — непараметрический показатель монотонной (ранговой) зависимости между двумя переменными. Коэффициент принимает значения от -1 (полная обратная монотонная зависимость) до $+1$ (полная прямая монотонная зависимость);
- коэффициент корреляции Кендалла — ранговый показатель зависимости, оценивающий согласованность пар рангов между двумя переменными. Этот коэффициент также варьируется от -1 до $+1$ и часто применяется для небольших выборок или когда данные имеют повторяющиеся ранги.

Также проверялось отсутствие инверсии квантилей (пересечения квантильных линий регрессии).

Расчет статистических коэффициентов, а также анализ остатков (нормаль-

Таблица 1

Значения магнитуды и массы ВВ, взрываемой за ступень [составлено авторами]

Magnitude values and mass of explosives detonated per delay interval [compiled by the authors]

Дата	Время	Номер блока	Энергия взрыва, Е, Дж	Масса ВВ (m), кг	Локальная магнитуда (M_L)
2024.12.11	13:00	243	3,94E+09	1686 (Гранулит)	2,3
2024.12.11	13:05	241	7,01E+09	3000 (РПГМ)	2,1
			8,25E+09	2230 (Гранулит)	
2024.12.13	13:00	242	9,18E+09	3930 (РПГМ)	2,4
			9,25E+09	2500 (Гранулит)	
16.12.2024	13:05	247	1,04E+10	4472 (РПГМ)	2,8
2024.12.17	13:10	248	6,83E+09	1846 (Гранулит)	2,8
2024.12.19	16:30	246	1,29E+10	5546 (РПГМ)	2,6
			1,51E+10	4092 (Гранулит)	
2025.07.24	14:05	138	3,30E+09	1415 (РПГМ)	2,2
2025.07.24	14:05	143	1,99E+09	853 (РПГМ)	2,2
2025.07.24	14:10	142	3,32E+09	1423 (РПГМ)	2,1
2025.07.25	15:05	140	6,62E+09	2836 (РПГМ)	2,3
2025.07.25	15:10	141	3,30E+09	1414 (РПГМ)	2,35

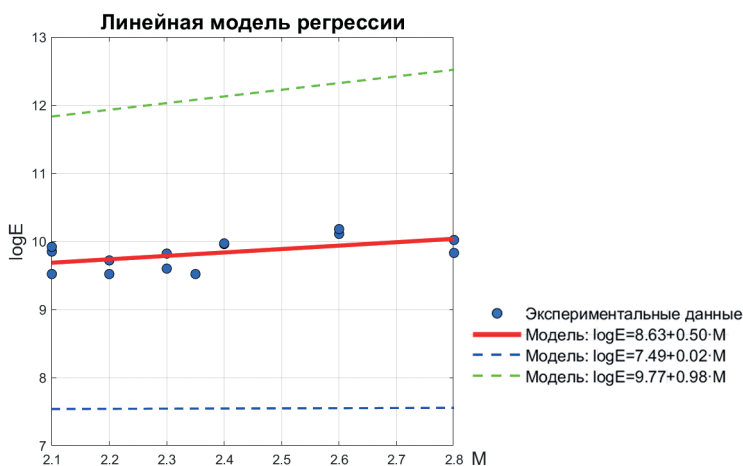


Рис. 1. Применение корреляционно-регрессионного анализа [составлено авторами]
 Fig. 1. Application of correlation-regression analysis [compiled by the authors]

ный вероятностный график, график остатков от предсказанных значений, автокорреляционная функция) проводились с использованием стандартных статистических пакетов.

Результаты и обсуждение

В качестве исходных данных использовался массив событий, зарегистрированных при проведении массовых взрывов на месторождениях Кузбасса (см. табл. 1). Для каждого события фиксировались дата, масса и тип ВВ (РПГМ или Гранулит), а также значение локальной магнитуды (M_L).

При этом энергия очага определялась как

$$\lg E = \lg(Q \cdot m),$$

где Q — удельная теплота взрыва (для РПГМ — 2335 кДж/кг, для Гранули-

та — 3700 кДж/кг); m — масса ВВ, взрываемого за ступень замедления.

Для установления корреляционной связи между логарифмом энергии ($\lg E$, независимая переменная) и магнитудой (M_L , зависимая переменная) был использован метод наименьших квадратов (МНК) (рис. 1).

На графике красная линия соответствует основному уравнению регрессии между энергией очага и магнитудой, а синяя и зеленая линии отражают альтернативные модели в пределах 95% доверительного интервала. Как видно из графика, альтернативные модели демонстрируют значительный разброс относительно основного уравнения.

В результате применения МНК была получена регрессионная зависимость между энергией взрыва и регистрируе-

Таблица 2

Коэффициенты регрессии [составлено авторами] Regression coefficients [compiled by the authors]

Параметр	Свободный член	Регрессионный коэффициент
Значение	8,63	0,5
Стандартная ошибка	0,52	0,22
t-статистика	16,4	2,28
p-значение	$1,33 \cdot 10^{-9}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3

Коэффициенты корреляции и детерминации [составлено авторами]
Correlation and determination coefficients [compiled by the authors]

Коэффициент	Значение
Коэффициент корреляции	0,55
Коэффициент детерминации	0,3
Скорректированный коэффициент детерминации	0,25

мой локальной магнитудой. Коэффициенты регрессии представлены в табл. 2 и являются статистически значимыми. Коэффициенты корреляции и детерминации приведены в табл. 3.

Кроме этого, был проведен ряд тестов на соответствие основным предположениям регрессионного анализа:

- тест Колмогорова–Смирнова ($p\text{-value} = 0,71$): остатки модели распределены нормально;
- тест Бреуша–Пагана ($p\text{-value} = 0,85$): гетероскедастичность отсутствует (дисперсия остатков постоянна);
- тест Дарбина–Уотсона ($DW = 1,57$): автокорреляция в остатках не обнаружена.

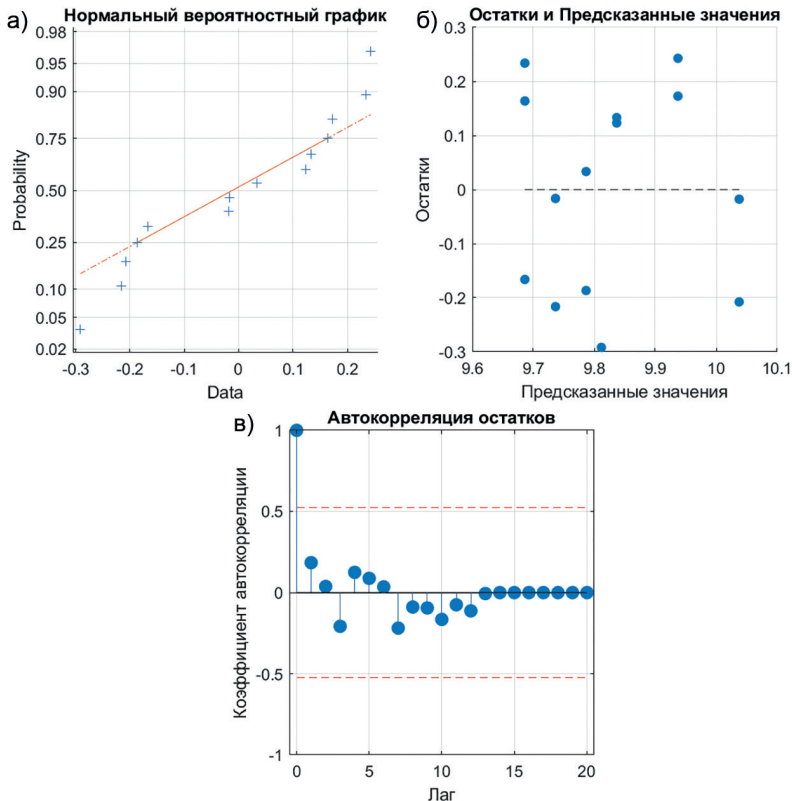


Рис. 2. Результаты регрессионного анализа: нормальный вероятностный график (а); график остатков от предсказанных значений (б); автокорреляционная функция остатков (в) [составлено авторами]

Fig. 2. Results of regression analysis: normal probability plot (a); plot of residuals vs. predicted values (b); autocorrelation function of residuals (v) [compiled by the authors]

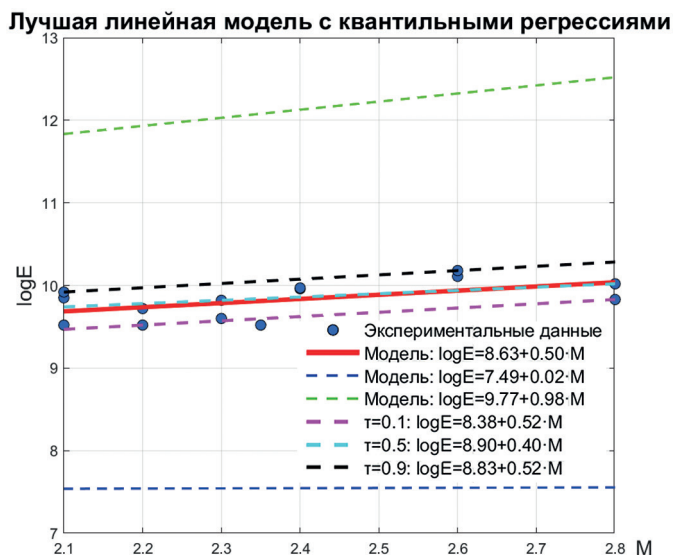


Рис. 3. Сравнение полученных регрессий [составлено авторами]

Fig. 3. Comparison of the obtained regressions [compiled by the authors]

Графическая интерпретация этих результатов, включая автокорреляционную функцию, представлена на рис. 2.

В результате использование корреляционно-регрессионного анализа показало наличие довольно слабой зависимости с большим разбросом значений и, как следствие, с широким доверитель-

ным интервалом. Для уточнения уравнения регрессии был применен метод квантильной регрессии [37] для трех квантилей: 10, 50 и 90%. Совместное расположение полученных уравнений регрессии представлено на рис. 3.

По результатам расчета получаем следующие уравнения квантильной ре-

Таблица 4

Параметры квантильной регрессии для $\tau = 0,1$ [составлено авторами]

Quantile regression parameters for $\tau = 0.1$ [compiled by the authors]

Параметр	Значение
Квантильная корреляция	0,34
Квантильный коэффициент детерминации	0,12
Коэффициент корреляция Спирмена	1
Коэффициент корреляция Кендалла	1

Таблица 5

Параметры квантильной регрессии для $\tau = 0,5$ [составлено авторами]

Quantile regression parameters for $\tau = 0.5$ [compiled by the authors]

Параметр	Значение
Квантильная корреляция	0,35
Квантильный коэффициент детерминации	0,12
Коэффициент корреляция Спирмена	1
Коэффициент корреляция Кендалла	1

грессии, при этом инверсия квантилей не обнаружена.

Для $\tau = 0,1$ (нижний 10%-ный квантиль) построено уравнение квантильной регрессии (см. табл. 4):

$$\log E = 8,38 + 0,52 \cdot M \quad (1)$$

Для $\tau = 0,5$ (медиана) построено уравнение квантильной регрессии (см. табл. 5):

$$\log E = 8,90 + 0,4 \cdot M \quad (2)$$

Для $\tau = 0,9$ (верхний 90%-ный квантиль) построено уравнение квантильной регрессии (табл. 6):

$$\log E = 8,83 + 0,52 \cdot M \quad (3)$$

Таким образом, лучшая объясняющая способность относится к уравнению регрессии $\tau = 0,9$ (верхний 90%-ный

квантиль). Однако для прогнозирования массы взрывчатого вещества на ступень замедления рекомендуется использовать регрессию для 10%-ного квантиля. Это обусловлено тем, что данная модель обеспечивает консервативную оценку: для взрывов с низкой энергией она предсказывает более низкие значения магнитуды, а для высокоэнергетических взрывов — завышенные, создавая тем самым «запас» при прогнозировании.

Произведем расчет предельно допустимых масс ВВ для двух типов ВВ по предлагаемой регрессии (табл. 7) по зависимости (1). Максимальную магнитуду следует ограничить $M_L < 3$, согласно решению координационного совета.

Предельно допустимым значением для Гранулита является масса в 2200 кг,

Таблица 6

Параметры квантильной регрессии для $\tau = 0,9$ [составлено авторами]
Quantile regression parameters for $\tau = 0.9$ [compiled by the authors]

Параметр	Значение
Квантильная корреляция	0,54
Квантильный коэффициент детерминации	0,29
Коэффициент корреляция Спирмена	1
Коэффициент корреляция Кендалла	1

Таблица 7

Расчет предельно допустимых масс ВВ, взрывааемых за ступень [составлено авторами]
Calculation of the maximum permissible mass of explosives detonated per delay interval [compiled by the authors]

Гранулит		РПГМ		Тротил	
m, τ	M	m, τ	M	m, τ	M
0,2	0,95	0,2	0,56	0,2	1,05
0,5	1,72	0,5	1,32	0,5	1,81
1,0	2,29	1,0	1,90	1,0	2,39
1,5	2,63	1,5	2,24	1,5	2,73
2,2	2,95	2,3	2,48	2,3	2,97
2,5	3,06	2,5	2,67	2,5	3,16
3,0	3,21	3,0	2,82	3,0	3,31
3,5	3,34	3,5	2,95	3,5	3,44
4,0	3,45	4,0	3,06	4,0	3,55

для РПГМ в 3500 кг ВВ, взрываемого за ступень, в тротиловом эквиваленте 2300 кг ВВ.

Заключение

В результате проведенного исследования была установлена корреляционная связь между энергией сейсмического события, рассчитанной через массу и тип взрывчатых веществ, и регистрируемой локальной магнитудой в условиях Кузбасса. Построена линейная регрессионная модель, связывающая логарифм энергии и магнитуду. Модель является статистически адекватной: остатки нормально распределены, гомоскедастичны и не автокоррелированы, что подтверждается соответствующими тестами. Выявленный значительный разброс данных вокруг линии регрессии обусловил применение метода квантильной регрессии. Это позволило получить уравнения для различных квантилей распределения, что дает более полное описание взаимосвязи.

Установлено, что наилучшая объясняющая способность модели наблюдается

для верхнего 90%-ного квантиля. Однако для целей консервативного прогнозирования и обеспечения сейсмической безопасности рекомендовано использовать модель для 10%-ного квантиля, которая дает завышенную оценку магнитуды для высокоэнергетических взрывов, гарантируя тем самым запас безопасности при проектировании взрывных работ.

На основе рекомендованной модели рассчитаны практические значения предельно допустимых масс ВВ, взрывааемых за ступень замедления: 2200 кг для Гранулита и 3500 кг для РПГМ. Эти значения могут быть использованы при проектировании взрывных работ для минимизации сейсмического воздействия.

Таким образом, совместное применение корреляционно-регрессионного и квантильного анализа позволяет решать задачи прогнозирования сейсмического воздействия от промышленных взрывов. Полученные результаты вносят вклад в развитие систем мониторинга и обеспечения промышленной безопасности на предприятиях минерально-сырьевого комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A.* Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores // *Eurasian Mining*. 2021, vol. 36, no. 2, pp. 3–7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01.
2. *Мороз Н. Е., Гендлер С. Г., Вьюников А. А., Разумов Е. Е.* Применение геомеханического показателя качества породы RQD для прогноза газодинамических явлений при проходке выработок на руднике «Интернациональный» // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2023. — № 4. — С. 628–639.
3. *Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р.* Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 257. — С. 822–832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.
4. *Ишейский В. А., Рядинский Д. Э., Магомедов Г. С.* Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываеваемого массива // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 9-1. — С. 79–95. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79.
5. *Должиков В. В., Рядинский Д. Э., Яковлев А. А.* Влияние интервалов замедления на амплитуды волн напряжений при изучении модели взрыва системы скважинных зарядов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 6-2. — С. 18–32. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.
6. *Коршунов В. А., Павлович А. А., Бажуков А. А.* Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 262. — С. 606–618.

7. *Маринин М. А.* Расчет параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы при открытой разработке месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 79–86. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.11.
8. *Афанасьев П. И., Павлович А. А., Мельников Н. Я., Николаев Р. В.* Особенности распространения сейсмозврывных волн в скальных прибортовых массивах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 1-1. — С. 15–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_15.
9. *Мороз Н. Е., Гендлер С. Г., Романевич К. В.* Оценка опасности газодинамических явлений на основе анализа натуральных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная» // Горная промышленность. — 2025. — № 2. — С. 65–72. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-65-72.
10. *Павлович А. А., Мельников Н. Я., Свириденко А. С., Шепель А. М.* Выявление особенностей деформирования бортов карьеров с использованием физического моделирования // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 72–79. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.10.
11. *Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Ворона У. Ю., Сержников Н. А.* Сейсмический эффект промышленных взрывов в Западной Сибири и наведенная сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2018. — Т. 45. — № 4. — С. 5–24. DOI: 10.21455/VIS2018.4-1.
12. *Адушкин В. В.* Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59. — № 5. — С. 709–724. DOI: 10.15372/GiG20180510.
13. *Панжин А. А.* Исследования природной и техногенной сейсмичности Кузнецкого угольного бассейна // Проблемы недропользования. — 2024. — № 1. — С. 102–114. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.102.
14. *Khallurin V. I., Ruetian T. O., Richards P. O.* The seismic signal strength of chemical explosions // Bulletin of the Seismological Society of America. 1998, vol. 88, no. 6, pp. 1511–1524. DOI: 10.1785/BSSA0880061511.
15. *Зуева И. А.* Особенности взрывной сейсмичности на территории Республики Карелия за 2017–2018 гг. // Вестник ВГУ. Серия: Геология. — 2018. — № 1. — С. 76–81. DOI: 10.17308/geology.2019.1/1719.
16. *Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская Н. В., Ризниченко Ю. В., Саваренский Е. Ф., Соловьев С. Л., Шебалин Н. В.* Стандартизация шкал магнитуд // Известия АН СССР. Серия Геофизическая. — 1962. — № 2. — С. 108–111.
17. *Петрова Н. В., Габсатарова И. П., Курова А. Д.* О влиянии глубины и расстояния на оценки магнитуд по поверхностным волнам / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XV Международной сейсмологической школы. — Обнинск, 2021. — 67 с.
18. *Мамыров Э.* Обоснование взаимосвязи магнитуды по объемным волнам с сейсмическим моментом землетрясений // Вестник Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики. — 2013. — № 1. — С. 50–58.
19. *Гончаров А. И., Куликов В. И., Эткин М. Б., Камчыбеков М. П.* Сейсмический эффект Камбаратинского взрыва // Динамические процессы в геосферах. — 2012. — № 3. — С. 48–57.
20. *Mushtaq M. N., Tahir M., Iqbal M. T., Shah M. A., Iqbal S., Iqbal T.* Calibration of local magnitude scale for Hindukush continental subduction zone // Earthquake Science. 2021, vol. 34, no. 2, pp. 114–122. DOI: 10.29382/eqs-2020-0022.
21. *Етирмишли Г. Д., Абдуллаева Р. Р., Исмаилова С. С., Казымова С. Э.* Сейсмичность Азербайджана и прилегающих территорий в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. — 2022. — № 25. — С. 56–65. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.04.
22. *Richter C. F.* An instrumental earthquake magnitude scale // Bulletin of the Seismological Society of America. 1935, vol. 25, pp. 1–32.
23. *Петрова Н. В., Курова А. Д.* Сопоставление систем классификации землетрясений в локальных магнитудах ML в некоторых регионах Северной Евразии // Российский сейсмологический журнал. — 2023. — Т. 5. — № 2. — С. 61–76. DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.05.
24. *Кочарян Г. Г., Будков А. М., Кишкина С. Б., Иванченко Г. Н.* О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года // Геодинамика и тектонофизика. — 2019. — Т. 10. — № 3. — С. 741–759. DOI: 10.5800/GT-2019-10-3-0439.
25. *Haigang Zheng, Zhejun Li, Xianliang Huang, Yuanchao Lu, Yikun Wang, Jinshui Huang, Hongyu Ni, Ziwen Bao, Peng Shu* Magnitude and seismogenic fault determination of ground effects paleoseismic-induced at Huoshan and Guzhen in Anhui province, China // Geodesy and Geodynamics. 2025, vol. 16, no. 4, pp. 479–487. DOI: 10.1016/j.jgeog.2025.02.002.

26. Адушкин В. В., Ловчиков А. В., Гоев А. Г. О возникновении катастрофического горно-тектонического удара на руднике «Умбозеро» в Ловозерском массиве в Центральной части Кольского полуострова // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2022. — Т. 504. — № 1. — С. 85–90. DOI: 10.31857/S2686739722050036.

27. Левин Б. В., Сасорова Е. В., Борисов С. А., Борисов А. С. Оценка параметров слабых землетрясений и их сигналов // Вулканология и сейсмология. — 2010. — № 3. — С. 60–70.

28. Kostylev D., Kostyleva N. V. The first results of the seismic monitoring system of the Solntsevsky open pit coal mine area (on Sakhalin Island) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 946, article 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012002.

29. Соловицкий А. Н. Об изучении региональных закономерностей сейсмичности в Кузбассе // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — Т. 10. — С. 43. DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.6.

30. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г., Куприш О. В. Наведенная сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — № 2(3). — С. 88–96.

31. Брыксин А. А., Селезнев В. С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика. — 2012. — Т. 53. — № 3. — С. 399–405.

32. Еманов А. А., Еманов А. Ф., Фатеев А. В., Лескова Е. В. Одновременное воздействие открытых и подземных горных работ на недра и наведенная сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии. — 2017. — Т. 44. — № 4. — С. 51–62. DOI: 10.21455/VIS2017.4-3.

33. Xu Li, Guangyao Si, Bobo Shi, Wenzhuo Cao, Wu Cai, Joung Oh, Ismet Canbulat Statistical properties of seismic foreshocks and aftershocks associated with longwall mining: Implications from the epidemic type aftershock sequence model // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2024, vol. 16, no. 12, pp. 4878–4894. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.02.021.

34. Massey Jr. F. J. The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit // Journal of the American Statistical Association. 1951, vol. 46, no. 253, pp. 68–78. DOI: 10.2307/2280095.

35. Breusch T. S., Pagan A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation // Econometrica. 1979, vol. 47, no. 5, pp. 1287–1294. DOI: 10.2307/1911963.

36. Статников К. А., Крученицкий Г. М. Статистическое моделирование глобальной тектонической активности и возможности физической интерпретации его результатов // Пространство и Время. — 2015. — Т. 1–2 (19–20). — С. 314–317.

37. Koenker R., Hallock K. Quantile regression // Journal of Economic Perspectives. 2001, vol. 15, no. 4, pp. 143–156. **МИАБ**

REFERENCES

1. Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite-nepheline ores. *Eurasian Mining*. 2021, vol. 36, no. 2, pp. 3–7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01.

2. Moroz N. E., Gendler S. G., V'yunikov A. A., Razumov E. E. Application of the rock quality designation (RQD) geomechanical index for forecasting gas-dynamic phenomena during mine development at the «Internationalny» mine. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2023, no. 4, pp. 628–639. [In Russ].

3. Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji, R. Fragmentation analysis using digital image processing and the empirical model (KuzRam): A comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 822–832. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.84.

4. Isheisky V. A., Ryadinskii D. E., Magomedov G. S. Increasing the quality of fragmentation of blasting rock mass based on accounting for structural features of massif in the blast design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 79–95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79.

5. Dolzhikov V. V., Ryadinsky D. E., Yakovlev A. A. Influence of deceleration intervals on the amplitudes of stress waves during the explosion of a system of borehole charges. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 18–32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.

6. Korshunov V. A., Pavlovich A. A., Bazhukov A. A. Assessment of shear strength of rocks along fractures based on test results of samples with spherical indenters. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 606–618. [In Russ].

7. Marinin M. A. Drill&blast design for preset grain-size composition of broken rocks in open pit mineral mining. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 3, pp. 79–86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.11.

8. Afanasev P. I., Pavlovich A. A., Melnikov N. Ya., Nikolaev R. V. Features of seismic explosive wave propagation in hard adjacent rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 1-1, pp. 16–18. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_16.
9. Moroz N. E., Gendler S. G., Romanevich K. V. Assessment of gas-dynamic hazard based on the analysis of field and laboratory studies of elastic wave velocities in host rocks of the «Internationalnaya» kimberlite pipe. *Russian Mining Industry Journal.* 2025, no. 2, pp. 65–72. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-65-72.
10. Pavlovich A. A., Melnikov N. Ya., Sviridenko A. S., Shepel A. M. Detection of pitwall deformation features using physical modeling. *Gornyi Zhurnal.* 2025, no. 3, pp. 72–79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.10.
11. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Shevkunova E. V., Vorona U. Yu., Serezhnikov N. A. Seismic effect of industrial explosions in Western Siberia and induced seismicity. *Voprosy Inzhenernoy Seismologii.* 2018, vol. 45, no. 4, pp. 5–24. [In Russ]. DOI: 10.21455/VIS2018.4-1.
12. Adushkin V. V. Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass. *Russian Geology and Geophysics.* 2018, vol. 59, no. 5, pp. 709–724. [In Russ]. DOI: 10.15372/GiG20180510.
13. Panzhin A. A. Studies of natural and technogenic seismicity of the Kuznetsk coal basin. *Problems of Subsoil Use.* 2024, no. 1, pp. 102–114. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.102.
14. Khallurin V. I., Rauetian T. O., Richards P. O. The seismic signal strength of chemical explosions. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1998, vol. 88, no. 6, pp. 1511–1524. DOI: 10.1785/BSSA0880061511.
15. Zueva I. A. Features of explosion-induced seismicity on the territory of the Republic of Karelia in 2017–2018. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Geology.* 2018, no. 1, pp. 76–81. [In Russ]. DOI: 10.17308/geology.2019.1/1719.
16. Vanek J., Zatopek A., Karnik V., Kondorskaya N. V., Riznichenko Yu. V., Savarenskiy E. F., Solov'ev S. L., Shebalin N. V. Standardization of magnitude scales. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geofizicheskaya.* 1962, no. 2, pp. 108–111. [In Russ].
17. Petrova N. V., Gabsatarova I. P., Kurova A. D. On the influence of depth and distance on surface wave magnitude estimates. *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh danykh: Tezisy XV Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Abstracts of the XV International Seismological School], Obninsk, 2021, 67 p. [In Russ].
18. Mamyrov E. Substantiation of the relationship between body wave magnitude and seismic moment of earthquakes. *Bulletin of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic.* 2013, no. 1, pp. 50–58. [In Russ].
19. Goncharov A. I., Kulikov V. I., Etkin M. B., Kamchybekov M. P. Seismic effect of the Kambarata explosion. *Dynamic Processes in Geospheres.* 2012, no. 3, pp. 48–57. [In Russ].
20. Mushtaq M. N., Tahir M., Iqbal M. T., Shah M. A., Iqbal S., Iqbal T. Calibration of local magnitude scale for Hindukush continental subduction zone. *Earthquake Science.* 2021, vol. 34, no. 2, pp. 114–122. DOI: 10.29382/eqs-2020-0022.
21. Etiermisli G. D., Abdullayeva R. R., Ismailova S. S., Kazymova S. E. Seismicity of Azerbaijan and adjacent territories in 2016–2017 *Earthquakes in Northern Eurasia.* 2022, no. 25, pp. 56–65. [In Russ]. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.04.
22. Richter C. F. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1935, vol. 25, pp. 1–32.
23. Petrova N. V., Kurova A. D. Comparison of earthquake classification systems in local magnitudes ML in some regions of Northern Eurasia. *Russian journal of seismology.* 2023, vol. 5, no. 2, pp. 61–76. [In Russ]. DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.05.
24. Kocharyan G. G., Budkov A. M., Kishkina S. B., Ivanchenko G. N. On the genesis of the Bachat earthquake of 2013. *Geodynamics & Tectonophysics.* 2019, vol. 10, no. 3, pp. 741–759. [In Russ]. DOI: 10.5800/GT-2019-10-3-0439.
25. Haigang Zheng, Zhejun Li, Xianliang Huang, Yuanhao Lu, Yikun Wang, Jinshui Huang, Hongyu Ni, Ziwen Bao, Peng Shu Magnitude and seismogenic fault determination of ground effects paleoseismic-induced at Huoshan and Guzhen in Anhui province, China. *Geodesy and Geodynamics.* 2025, vol. 16, no. 4, pp. 479–487. DOI: 10.1016/j.geog.2025.02.002.
26. Adushkin V. V., Lovchikov A. V., Goev A. G. On the occurrence of a catastrophic rock-tectonic burst at the «Umbozero» mine in the Lovozero massif in the central part of the Kola Peninsula. *Doklady*

Rossijskoj akademii nauk. *Nauki o Zemle*. 2022, vol. 504, no. 1, pp. 85–90. [In Russ]. DOI: 10.31857/S2686739722050036.

27. Levin B. V., Sasorova E. V., Borisov S. A., Borisov A. S. Estimation of parameters of weak earthquakes and their signals. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2010, no. 3, pp. 60–70. [In Russ].

28. Kostylev D., Kostyleva N. V. The first results of the seismic monitoring system of the Solntsevsky open pit coal mine area (on Sakhalin Island). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 946, article 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012002.

29. Solovitskiy A. N. On the study of regional patterns of seismicity in Kuzbass. *International Research Journal*. 2024, vol. 10, pp. 43. [In Russ]. DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.6.

30. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Shevkunova E. V., Podkorytova V. G., Kuprish O. V. Induced seismicity in coal and iron ore regions of Kuzbass. *Russian journal of seismology*. 2020, no. 2(3), pp. 88–96. [In Russ].

31. Bryksin A. A., Seleznev V. S. Influence of technogenic factors on seismicity of the Kuzbass and Lake Baikal regions. *Russian Geology and Geophysics*. 2012, vol. 53, no. 3, pp. 399–405. [In Russ].

32. Emanov A. A., Emanov A. F., Fateev A. V., Leskova E. V. Simultaneous impact of open-pit and underground mining on the subsurface and induced seismicity. *Problems of Engineering Seismology*. 2017, vol. 44, no. 4, pp. 51–62. [In Russ]. DOI: 10.21455/VIS2017.4-3.

33. Xu Li, Guangyao Si, Bobo Shi, Wenzhuo Cao, Wu Cai, Joung Oh, Ismet Canbulat. Statistical properties of seismic foreshocks and aftershocks associated with longwall mining: Implications from the epidemic type aftershock sequence model. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024, vol. 16, no. 12, pp. 4878–4894. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.02.021.

34. Massey Jr. F. J. The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*. 1951, vol. 46, no. 253, pp. 68–78. DOI: 10.2307/2280095.

35. Breusch T. S., Pagan A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*. 1979, vol. 47, no. 5, pp. 1287–1294. DOI: 10.2307/1911963.

36. Statnikov K. A., Kruchenitsky G. M. Statistical modeling of global tectonic activity and possibilities of physical interpretation of its results. *Space and Time*. 2015, vol. 1–2 (19–20), pp. 314–317. [In Russ].

37. Koenker R., Hallock K. Quantile regression. *Journal of Economic Perspectives*. 2001, vol. 15, no. 4, pp. 143–156. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Павел Игоревич¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru,

Ахметов Адиль Русланович¹ — студент, e-mail: s201038@stud.spmi.ru,

Фадеев Александр Александрович² — технический директор,

Шмонин Иван Викторович² — заместитель

технического директора по БВР, e-mail: shmonin@kru.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

² АО «УК «Кузбассразрезуголь».

Для контактов: Афанасьев П.И., e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.I. Afanasev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru,

A.R. Akhmetov¹, Student, e-mail: s201038@stud.spmi.ru,

A.A. Fadeev², Technical Director,

I.V. Shmonin², Deputy Technical Director, e-mail: shmonin@kru.ru,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia,

² JSC «Coal company «Kuzbassrazrezugol», 650054, Kemerovo, Russia.

Corresponding author: P.I. Afanasev, e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 15.12.2025; получена после рецензии 12.01.2026; принята к печати 19.01.2026.

Received by the editors 15.12.2025; received after the review 12.01.2026; accepted for printing 19.01.2026.