

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ И КАЛИБРОВКИ ДАННЫХ ТЕЛЕМЕТРИИ ПО ПРОЦЕССУ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН

В. А. Ишейский¹, М. А. Маринин¹, К. И. Петерс²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург,
199106, Россия, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru

² ООО «ВЗРЫВ ГРУПП», Кемерово, 650000, Россия, e-mail: k.peters@vgroup.one

Аннотация: Телеметрические системы бурения взрывных скважин представляют собой передовой инструментарий для оперативного мониторинга горного массива и оптимизации буровзрывных работ в горной промышленности. Они обеспечивают получение детальной геолого-технологической информации в оперативном режиме с повышенной экономической эффективностью относительно традиционных методов исследования. Однако существующие методики интерпретации данных сталкиваются с существенными ограничениями из-за изменчивости геологии и различий в оборудовании, что затрудняет их универсальное применение. Для достижения максимальной эффективности требуется индивидуальная калибровка указанных телеметрических систем под конкретные геолого-технические условия месторождения, как показывает опыт их эксплуатации на угольных разрезах Кузбасса. В статье предложен подход к детализации геологической информации, основанный на сопоставлении данных бурения (преимущественно расчетной энергоемкости) по контурным скважинам с наблюдаемым фактическим геологическим строением уступа после его зачистки. Для картирования геологии откоса уступа применяется фото/видеофиксация или фотограмметрия с помощью БЛА, результаты которых сопоставляются с данными телеметрии. При использовании разных моделей буровых станков возникает проблема несовпадения измеряемых параметров из-за конструктивных особенностей. Для решения этой проблемы предложены подходы калибровки данных телеметрии бурения относительно эталонного станка. Применение калибровочных коэффициентов обеспечивает единую систему отсчета данных, что повышает достоверность геологической интерпретации и качество построения блочных моделей.

Ключевые слова: шарошечное бурение, телеметрия бурения, энергоемкость бурения, взрывные скважины, калибровка телеметрических данных.

Для цитирования: Ишейский В. А., Маринин М. А., Петерс К. И. Методика интерпретации и калибровки данных телеметрии по процессу шарошечного бурения взрывных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_5.

Processing and calibration methodology of telemetry data for the process of roller-bit drilling of blast wells

V. A. Isheyskiy¹, M. A. Marinin¹, K. I. Peters²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru

² LLC " VZRYV GRUPP ", Kemerovo, 650000, Russia, e-mail: k.peters@vgroup.one

Abstract: Drilling telemetry systems are an effective tool in the mining industry for operational characterization of the massif and optimization of drilling and blasting operations, providing more detailed and cost-effective geological information compared to traditional methods. Despite successful implementations, there are unresolved issues in data interpretation related to the variability of geology and differences in equipment (types of systems, drilling rigs), which complicates the universal application of methods. Data interpretation methods often require individual calibration for a specific deposit/site taking into account the geological structure and the measurement systems used, which is confirmed by the example of Kuzbass open-pit mines. The article proposes an approach to further clarifying geological information by comparing drilling data (especially the estimated drilling energy intensity) for contour or other available blastholes with the actual geological structure observed on the bench slope after the blast. For detailed mapping of the slope geology and precise binding of geological boundaries to borehole depths, video recording and photogrammetry using UAVs are effectively used, followed by comparison with telemetry data. The use of different models of drilling rigs leads to a discrepancy between the measured parameters and the estimated drilling specific energy intensity in the same geological conditions due to design features. It is necessary to calibrate data from different rigs relative to the reference one. Two approaches are proposed: equalization of the final specific energy intensity or search for correction factors for individual telemetry parameters in areas with homogeneous geology. The use of calibration coefficients allows data from different rigs to be converted to a single reference system, ensuring comparability of specific energy intensity indicators and the reliability of subsequent geological interpretation and construction of block models.

Key words: drilling telemetry, drilling specific energy intensity, blastholes, drilling rig calibration.

For citation: Isheyskiy V. A., Marinin M. A., Peters K. I. Processing and calibration methodology of telemetry data for the process of roller-bit drilling of blast wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11-1):5–22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_5.

Введение

Телеметрические системы бурения взрывных скважин представляют собой передовой инструментарий в горной промышленности. Использование телеметрических данных при проектировании взрывных работ позволяет корректно принимать параметры буровзрывных работ (БВР) с учетом геологических особенностей и структуры массива. Данные, полученные в процессе бурения взрывных скважин и прошедшие процедуру интерпретации, предо-

ставляют более детальную информацию о взрываемом массиве по сравнению с традиционными геологическими оценками, при этом являясь экономически эффективным и оперативным методом уточнения геологической информации. Это подтверждается рядом современных исследований отечественных и зарубежных учёных [1–4].

На сегодняшний день накоплен обширный опыт реализации проектов, успешно применяющих технологию измерения параметров бурения

в режиме реального времени (MWD) с последующей интерпретацией данных для инженерных расчетов [5–7]. Особого внимания заслуживают фундаментальные научные исследования, которые существенно расширили понимание взаимосвязи между данными бурения и геолого-структурными характеристиками массива горных пород [8–10]. В последнее десятилетие активно используются методы машинного обучения при интерпретации данных телеметрии [11–14].

В настоящее время научные коллективы сосредоточены на решении ключевых задач по интерпретации данных и установлению взаимосвязи между параметрами бурения и взрывных работ [15–19]. Тем не менее, как показывает анализ существующих исследований [1], ряд нерешённых проблем препятствует широкому внедрению данной технологии с возможностью её прямого переноса и масштабирования на различные условия.

В последние годы сформировалась комплексная методология интерпретации данных бурения в геолого-структурную информацию. Были разработаны как базовые методы, использующие простые параметры [20, 21], так и продвинутое подходы, основанные на анализе удельной энергии и статистических методах [22–25]. Несмотря на разнообразие предложенных решений для систем измерения во время бурения, их успешное применение часто требует индивидуальной калибровки с учётом особенностей используемого оборудования, конкретного месторождения, рудника или шахты [26–29].

Методы интерпретации данных, применяемые различными исследователями, существенно отличаются, что приводит к противоречивым результатам. Такая ситуация обусловлена неоднородностью геологических условий

на разных месторождениях, а также использованием разнообразных систем измерения и бурового оборудования. При этом подходы к интерпретации должны учитывать специфику конкретных систем измерений и особенности геологического строения участка работ [30, 31]. Поэтому интерпретация данных телеметрии требует индивидуального подхода к каждому объекту и должна подтверждаться известными геологическими данными. Практическая реализация такого подхода продемонстрирована на примере внедрения систем телеметрии при бурении на угольных разрезах Кузбасса [32–34].

Объект исследования и методы

В процессе исследования изучаются две ключевые области: обнаженная поверхность откоса уступа и телеметрические данные скважин контурного ряда (или скважин первого ряда до проведения взрывных работ, а также последних рядов по линии отрыва). Такой выбор скважин обусловлен возможностью визуального наблюдения геологических структур после взрыва, что позволяет провести детальное сопоставление с данными телеметрии бурения по глубине и рассчитанными показателями энергоёмкости бурения.

Сбор данных для геологического картирования откоса уступа выполнен методом фото- и видеофиксации обнажений с привязкой к координатам пространства в точках пересечения скважин с породами по глубине. Также сбор данных может быть реализован фотограмметрическим методом. Пример результата картирования отражен на рис. 1 и 2.

Для сбора данных может применяться как специализированный геодезический беспилотный летательный аппарат (БЛА), так и бытовые модели БЛА, оснащённые качественными камерами [35]. В текущем исследовании



Рис. 1. Фотография откоса и исследуемых скважин контурного ряда (Цифровые обозначения: 1 – уголь; 2 – алевролит; 3 – песчаник; 4 – алевролит; 5 – песчаник) [составлено авторами]

Fig 1. Photograph of the slope and the studied boreholes of the contour row (Designations: 1 – coal; 2 – siltstone; 3 – sandstone; 4 – siltstone; 5 – sandstone)

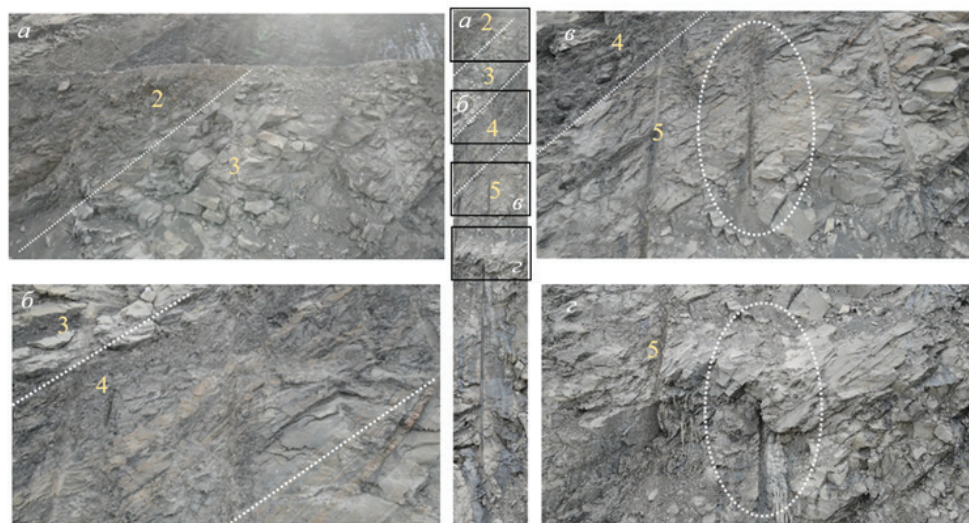


Рис. 2. Пример анализа скважины контурного ряда (Цифровые обозначения: 1 – уголь; 2 – алевролит; 3 – песчаник; 4 – алевролит; 5 – песчаник) [составлено авторами]

Fig. 2. Example of survey of borehole 475 of the contour row (Designations: 1 – coal; 2 – siltstone; 3 – sandstone; 4 – siltstone; 5 – sandstone)

применялся БЛА с камерой Hasselblad L1D – 20С с CMOS-матрицей 20 МП.

Полученные фото- и видеоматериалы имеют временные метки и геодезическую привязку, что обеспечивает пространственный анализ данных. Для повышения точности измерений может

применяться метод геодезических промеров с использованием специальных рулеток, которые протягиваются вдоль траектории наблюдаемой скважины от верхнего горизонта к нижнему.

Привязка геологических данных по глубине скважины выполняется

путем вычитания высоты наблюдения от высотной отметки устья. При работе с БЛА точка взлёта принимается за нулевую отметку и сопоставляется с известными высотными точками. Пример идентификации высотной отметки с БЛА показана на рис. 3.

Для картирования поверхности откоса и отдельных скважин приме-

нены две автоматические траектории полета БЛА. На опытном участке (площадь 2840 м²) было выставлено 15 вертикальных пролетных линий, синхронизированных с траекториями бурения. Результаты картирования скважин представлены в табл. 1 и рис. 4.

Далее для трёх основных типов пород (уголь, алевролит, песчаник)

Таблица 1

Пример информация по результатам картирования откоса уступа [составлено авторами]
Summary information on the results of the survey of the bench slope

№ скважины	Высотная отметка		Интервал глубины	Преимущественно сложены
	Устья	Забоя		
483	119.9	84.1	от 0.0 до -13.4	уголь
482	120.0	86.9	от 0.0 до -10.0	уголь
481	120.1	86.5	от 0.0 до -8.6	уголь
480	120.0	86.5	от 0.0 до -5.0	уголь
			от -5.0 до -16.0	алевролит
			от -16.0 до -21.0	песчаник
			от -21.0 до -28.0	алевролит
479	120.1	87.9	от 0.0 до -3.1	уголь
			от -3.1 до -12.0	алевролит
			от -14.0 до -17.0	песчаник
			от -18.0 до -24.0	алевролит
			от -24.0 до -32.0	песчаник
477	120.2	86.6	от -2.0 до -6.0	алевролит
			от -6.0 до -12.0	песчаник
			от -12.0 до -18.0	алевролит
			от -18.0 до -32.0	песчаник
476	120.0	86.6	от 0.0 до -4.0	алевролит
			от -4.0 до -9.0	песчаник
			от -9 до -15.0	алевролит
			от -16.0 до -32.0	песчаник
475	120.1	87	от -2.0 до -6.0	песчаник
			от -7.0 до -12.0	алевролит
			от -14.0 до -32.0	песчаник
473	120.3	87.5	от -2.0 до -7.0	алевролит
			от -8.0 до -32.0	песчаник
472	119.8	89.5	от 0 до -6.0	алевролит
			от -7.0 до -30.0	песчаник
471	120.3	90.2	от 0 до -30,1	песчаник
470	120.2	90	от 0 до -30.2	песчаник
469	120.1	89.8	от 0 до -30.3	песчаник



Рис. 3. Точка наблюдения на глубине 9 метров (высотной отметке +111 относительно нулевой отметки запуска +90 и прироста по высоте относительно точки запуска +21 м) при идентификации раздела песчаник/алевролит [составлено авторами]
 Fig. 3. Observation point at a depth of 9 meters (elevation mark +111 relative to the zero launch mark +90 and an increase in height relative to the launch point +21 m) during identification of the sandstone/siltstone section

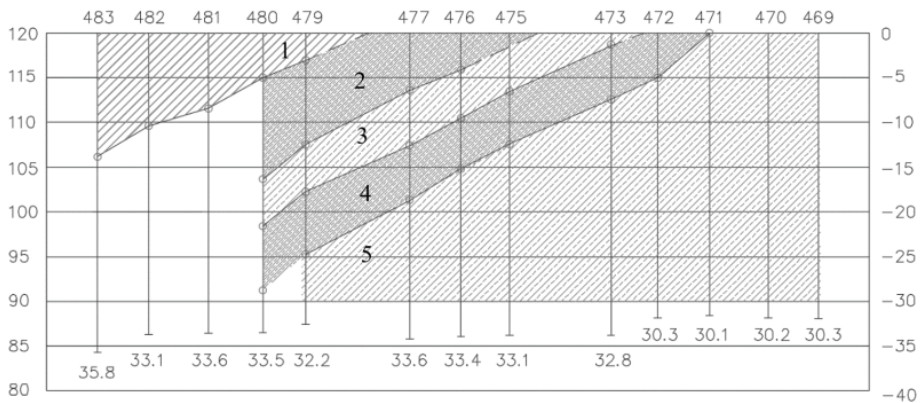


Рис. 4. Результат геологического картирования скважин контурного ряда (Цифровые обозначения: 1 – уголь; 2 – алевролит; 3 – песчаник; 4 – алевролит; 5 – песчаник) [составлено авторами]
 Fig. 4. Result of geological mapping of boreholes of the contour row (Designations: 1 – coal; 2 – siltstone; 3 – sandstone; 4 – siltstone; 5 – sandstone)

определяются пределы или интервалы расчётных значений показателей энергоёмкости, описывающих выделенные геологические разновидности. Методика расчета показателя энергоёмкости бурения приведена в исследовании [1].

Статистический анализ расчётных значений включает определение среднего значения, медианы, минимума, максимума, квартилей и среднеквадратического отклонения. Результаты анализа данных по группам (табл. 1)

Таблица 2

Статистическая обработка значений энергоёмкости бурения [составлено авторами]
Statistical processing of the values obtained for the drilling specific energy

Значения	Энергоёмкость бурения		
	Уголь	Алевролит	Песчаник
Среднее значение	17,78	28,21	35,21
Медиана	18,04	28,98	35,57
Минимум	9,85	9,59	11,69
Максимум	27,94	38,92	47,79
Среднеквадратическое отклонение	3,16	4,29	4,02
q0.25	16,36	26,72	33,27
q0.5	18,04	28,98	35,57
q0.75	19,36	30,70	37,62

с указанием множественных значений расчетного показателя энергоёмкости на разных глубинах представлены в табл. 2.

По данным статистического анализа приняты интервалы цветовой шкалы, идентифицирующую одну из указанных групп пород или пограничные зоны перехода между породами. Принятая шкала с интервалами представлена на рис. 5 и 6.

После процедуры усреднения по глубине [32] визуализированные данные по каждой скважине нанесены на график и сопоставлены с данными по процессу бурения (рис. 5), а также с результатами картирования уступа (рис. 6).

При отсутствии геологических данных информация может быть представлена в виде цветового градиента без предварительной привязки к геологическим

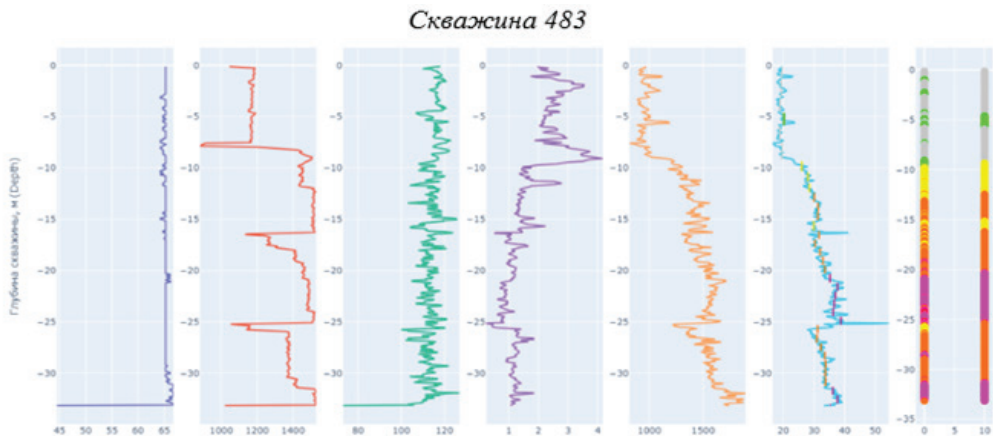


Рис. 5. Пример визуальной интерпретации данных по процессу бурения взрывных скважин [составлено авторами]

Fig. 5. An example of visual interpretation of data on the drilling process of blastholes [compiled by the authors]

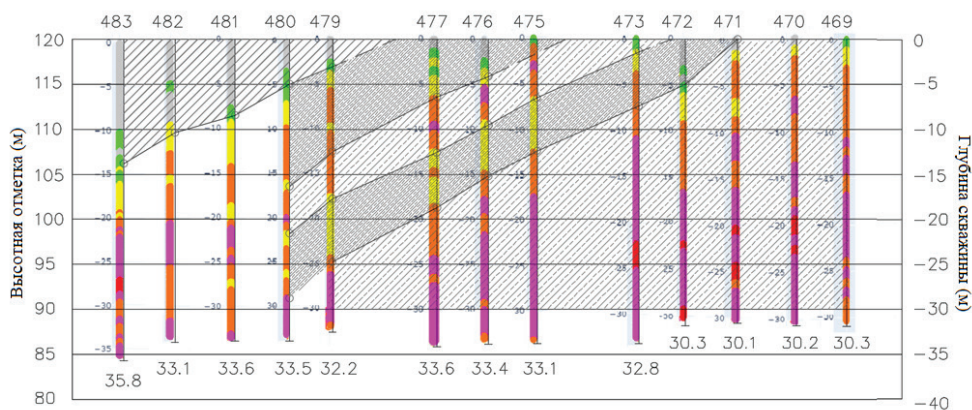


Рис. 6. Сводное сопоставление данных по процессу бурения с показателями энергоёмкости (усреднение данных на 1 метр скважины) по глубине и результатами геологического картирования скважин контурного ряда [составлено авторами]

Fig. 6. Summary comparison of data on the drilling process with specific energy indicators (averaging data per 1 meter of the borehole by depth and the results of geological mapping of boreholes of the contour row

данным. В данном случае необходимо устанавливать градиент по минимальным и максимальным значениям показателя энергоёмкости, зафиксированного при бурении совокупности блоков.

Результат построения блочной модели на основе данных по процессу бурения с расчетным показателем энер-

гоёмкости бурения по глубине приведен на рис. 7.

Подходы к калибровке данных по телеметрии бурения

При использовании разных буровых станков существует проблема в сопоставлении данных.

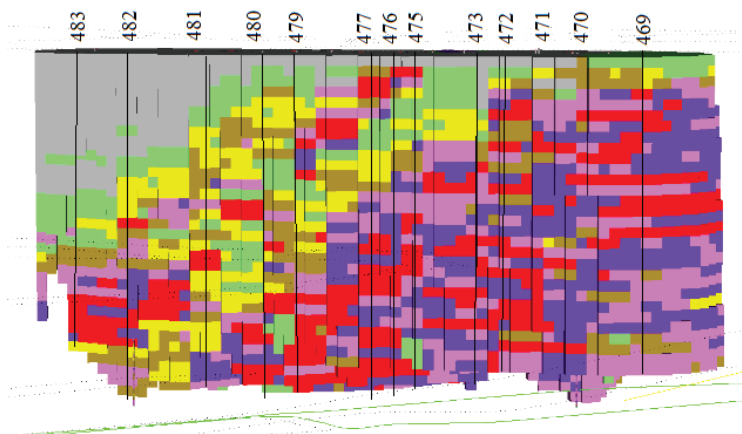


Рис. 7. Сводное сопоставление данных по процессу бурения с показателями энергоёмкости по глубине [составлено авторами]

Fig. 7. Summary comparison of drilling process data with specific energy indicators by depth for boreholes

На основе анализа первичных материалов установлено, что на предприятиях используются разные типы и марки станков. Калибровочный коэффициент k призван уравнивать значения энергоёмкости, полученные по одной из расчетных формул для одинаковых условий при бурении (одинаковые породы) но при использовании разных станков. Так же коэффициенты могут быть использованы для уравнивания показателей, входящих в расчетную величину энергоёмкости (осевое давление, давление вращения и т.д.).

Далее приведем примеры поиска калибровочных коэффициентов для данных телеметрии бурения относительно двух подходов.

Первый подход заключается в прямом уравнивании расчетных показателей энергоёмкости на разных станках друг относительно друга в одинаковых условиях по всей совокупности данных телеметрии.

Второй подход заключается в поиске различий отдельных показателей телеметрии относительно разных станков, участвующих в процессе бурения, и поиска уравнивающих коэффициентов для каждого отдельного параметра телеметрии бурения.

Оба подхода были реализованы как по всем типам пород, так и отдельно по углю. Калибрование по углю дает более точные данные для поиска коэффициентов, однако, не все станки участвуют в бурении по угольным пластам, что накладывает некоторые ограничения на использование данного подхода. В этой связи, калибровка по всей совокупности буримых пород так же может быть реализована с достаточной достоверностью для поиска уравнивающих коэффициентов.

Разнообразие бурового оборудования на участке работ приводит к существенному разбросу показателей энер-

гоёмкости бурения даже в схожих горно-геологических условиях. Это обусловлено конструктивными особенностями станков. Для унификации данных выбран эталонный станок Sandvik D50KS, относительно которого производится калибровка показателей других станков. Рассмотрим процедуру калибровки данных станка Epiroc DML LP-1200 по отношению к эталонному.

На представленных планах опытного блока (рис. 8–9) профильные линии демонстрируют характерное геологическое строение массива. Анализ показывает следующее распределение пород:

- В интервале профильных линий 18–21 преобладают алевролиты;

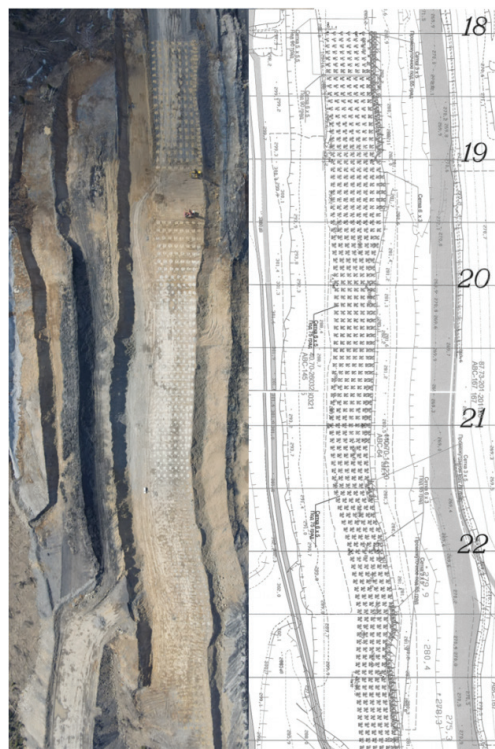


Рис. 8 План и фотография опытного блока между профильными линиями 18–24 [составлено авторами]

Fig. 8. Plan and photograph of block between profile lines 18–24

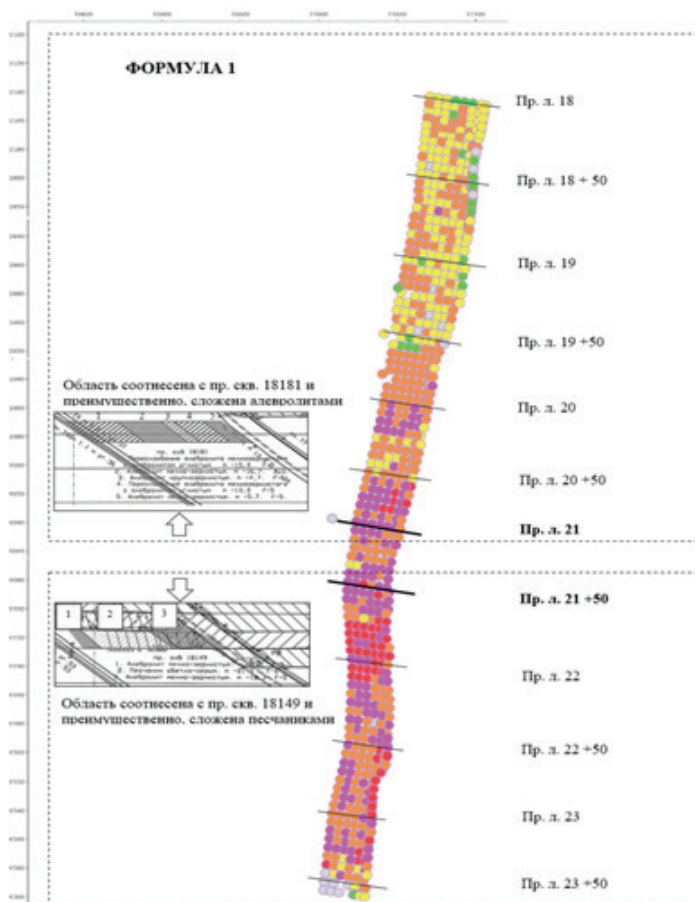


Рис. 9. Общий план распределения показателя энергоёмкости бурения [составлено авторами]
 Fig. 9. Example of results of the Rig calibration procedure

- В интервале профильных линий 21–23 доминируют песчаники.

На рис. 10 представлены зоны бурения станков Epiroc DML LP-1200 (обозначены красным маркером) и эталонного Sandvik D50KS (зелёный маркер). Места бурения подобраны с учётом идентичности горно-геологических условий, что критически важно для обеспечения точности калибровки. Дополнительным фактором повышения точности калибровки служит сбор данных при параллельном бурении рядов обоими исследуемыми станками, что позволяет минимизировать влияние геологических неоднородностей.

Калибровка данных может осуществляться как по уравниванию расчетных показателей энергоёмкости, так и по отдельным параметрам телеметрии путем ввода поправочных коэффициентов. Калибровка должна осуществляться на участках с четко идентифицируемой однородной геологией без переслаиваний и изменений геологических данных. Пример проведенной процедуры калибровки представлен на рис. 11, а её результаты сведены в табл. 3–4.

Проведенная процедура калибровки обеспечила согласованность расчетных показателей энергоёмкости бурения

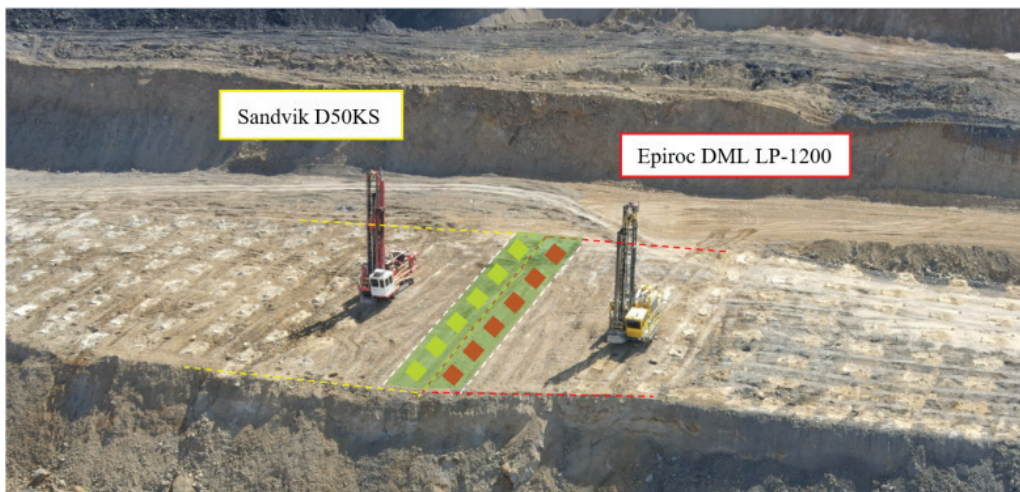


Рис. 10. Смежная область бурения в схожих горно-геологических условиях, представляющая область интереса для калибровки данных станков [составлено авторами]
 Fig. 10. Adjacent drilling area in similar mining and geological conditions, representing an area of interest for rig calibration

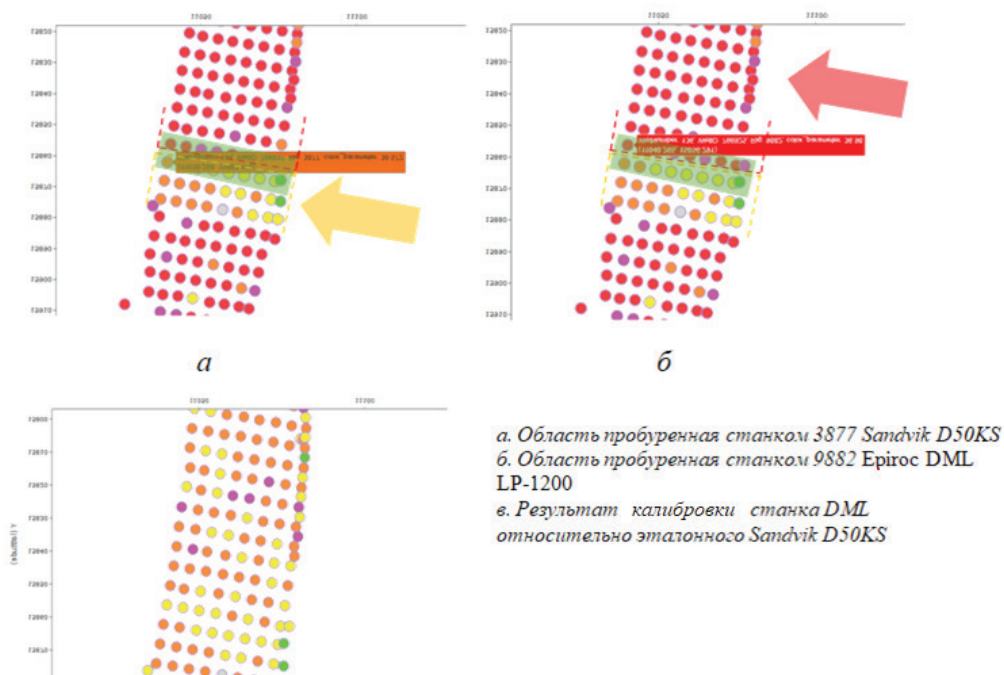


Рис. 11. Пример результатов проведения процедуры калибровки станков [составлено авторами]
 Fig. 11. Example of results of the Rig calibration procedure [compiled by the authors]

Таблица 3

Числовые значения распределения совокупности данных по процессу бурения расчетного показателя энергоемкости [составлено авторами]

Values of the distribution of data set on the drilling process of the calculated specific energy intensity indicator for all rigs

Станок №	1	2	3	Эталон	4	5
Среднее значение	34,39	46,70	30,88	31,29	33,57	35,55
Медиана	34,21	47,46	31,27	31,51	33,73	35,83
Минимум	5,01	4,86	3,53	1,43	4,06	4,48
Максимум	72,33	94,36	67,40	78,54	74,95	64,79
std)	5,58	7,36	4,19	4,28	5,09	5,29
q0.25	31,03	42,45	29,08	28,94	30,56	32,70
q0.5	34,21	47,46	31,27	31,51	33,73	35,83
q0.75	37,88	51,48	33,25	33,84	36,85	38,89
k (м)	0,92	0,66	1,01	1,00	0,93	0,88
k (ср)	0,91	0,67	1,01	1,00	0,93	0,88

Таблица 4

Значения искомых коэффициентов относительно эталонного станка по медиане [составлено авторами]

Values of the required coefficients relative to the reference rigs by the median [compiled by the authors]

Станок №	Е (k)	Осевое давление (K ₁)	Скорость вращения (K ₂)	Скорость бурения (K ₃)	Давление вращения (K ₄)	Давление воздуха (K ₅)
1	0,92	0,89	0,93	1,06	0,94	1,13
2	0,66	0,51	0,95	0,95	0,71	0,91
3	1,01	1,04	1,06	1,14	1,01	1,34
Эталон	1	1	1	1	1	1
4	0,93	0,75	1,15	1,43	1,07	0,96
5	0,88	0,91	0,85	0,96	0,88	1,2

различных станков с характеристиками буримых горных пород. Отсутствие завышенных значений показателя свидетельствует о корректности выполненной калибровки.

Данный метод калибровки позволяет:

- проводить достоверный анализ геологических данных;
- осуществлять интерпретацию в различные технологические показатели (индекс взрываемости, буримости и др.) без искажений, обусловленных

особенностями разных моделей бурового оборудования;

- достичь единой точки отсчета расчетного показателя энергоемкости бурения для всех станков.

Сущность процедуры заключается в приведении всех измерительных данных к унифицированной системе посредством калибровочных коэффициентов, что обеспечивает сопоставимость показателей независимо от специфики собираемых данных.

Определение калибровочных коэффициентов открывает возможность для создания блочной модели, необходимой при дальнейшей интерпретации геологических данных. Практическая реализация этого подхода осуществляется путем индивидуальной подстановки полученных коэффициентов в расчетную формулу энергоемкости бурения для каждого параметра, участвующего в вычислении данного показателя. Такой подход позволяет обеспечить высокую точность моделирования и достоверность получаемых геологических данных.

Выводы

Системы телеметрии бурения представляют собой эффективный инструмент для получения детальной геологической информации и оптимизации буровзрывных работ. Однако их широкое внедрение осложняется сложностью универсальной интерпретации данных, обусловленной вариативностью геологических условий и различиями в буровом оборудовании.

В работе представлен практический подход к детализации геологической информации и интерпретации данных, основанный на сопоставлении расчетных показателей (прежде всего, энергоемкости бурения) с фактическим геологическим строением. Методика апробирована на примере угольных разрезов Кузбасса.

Статистический анализ данных, привязанных к закартированным геологическим разностям (уголь, алевролит, песчаник), позволил определить характерные диапазоны значений энергоемкости бурения для каждого типа пород в конкретных условиях. Это дало возможность использовать данный показатель для геологической идентификации.

Особое внимание уделено проблеме калибровки буровых станков. Установ-

лено, что применение различных моделей бурового оборудования приводит к несопоставимым значениям измеряемых параметров и расчетной энергоемкости бурения. Разработанная методика калибровки предусматривает выбор эталонного станка и расчет поправочных коэффициентов (как для итоговой энергоемкости, так и для отдельных параметров телеметрии) на участках с однородной геологией.

Следует обратить особое внимание на режим работы бурового оборудования и рассматривать установленные коэффициенты в динамике изменения буровых параметров станка. Было выявлено, что калибровочный коэффициент может носить динамический характер и изменяться в зависимости от показателей телеметрии бурения при прочих равных условиях буримого массива. Это требует дополнительного исследования и анализа полученных результатов.

Таким образом, предложенный комплексный подход обеспечивает возможность эффективного использования данных телеметрии бурения для решения геологических задач и оптимизации производственных процессов на предприятии.

Вклад авторов

Ишейский В. А. — написание текста статьи, постановка задачи исследования, генерация идеи исследования, разработка методики, проведение исследований.

Маринин М. А. — написание текста статьи, анализ результатов исследования и подготовка данных, проведение исследований.

Петерс К. И. — выполнение работы по систематизации материала, анализ результатов исследования, написание текста статьи, руководство полевыми работами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Isheyskiy V., Sanchidrián J. A.* Prospects of Applying MWD Technology for Quality Management of Drilling and Blasting Operations at Mining Enterprises // *Minerals*. 2020, vol. 10, 925. <https://doi.org/10.3390/min10100925>.
2. *Александров В. Г.* Экспериментальная проверка адекватности фракционно-энергетического подхода к расчету параметров буровзрывных работ по телеметрическим данным // *Известия вузов. Горный журнал*. — 2024. — № 4. — С. 97–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97-112.
3. *Navarro J., Sanchidrian J. A., Segarra P., Castedo R., Costamagna E., Lopez L. M.* Detection of potential overbreak zones in tunnel blasting from MWD data // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 82, pp. 504–516.
4. *Navarro J., Sanchidrian J. A., Segarra P., Castedo R., Paredes C., Lopez L. M.* On the mutual relations of drill monitoring variables and the drill control system in tunneling operations // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 72, pp. 294–304.
5. *Khorzoughi M. B., Hall R., Apel D.* Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28(6), pp. 859–864.
6. *Akyildiz O., Basarir H., Ellefmo S. L.* The development of a lithology prediction model using measurement while drilling data in a quartzite quarry // *Int J Min Reclam Environ*. 2024. <https://doi.org/10.1080/17480930.2024.2362577>.
7. *Опанасенко П. И., Исаиченков А. В.* The Blast maker software/hardware complex use in drilling and-blasting designing in Tugnuisky open pit mine // *MIAВ. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013, no. S2, pp. 38–57.
8. *Тангаев И. А.* Буримость и взрываемость горных пород. — М.: Недра, 1978. — 184 с.
9. *Серебряков Е. В., Гладков А. С., Гапфаров Т. Д.* Обзор современных методов сбора данных для оценки структурной нарушенности горного массива // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 9. — С. 160–177. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_160.
10. *Teale R.* The concept of specific energy in rock drilling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier. 1965, p. 245. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7.
11. *Goldstein D. M., Aldrich C., O'Connor L.* A review of orebody knowledge enhancement using machine learning on open-pit mine measure-while-drilling data // *Mach Learn Knowl Extr*. 2024, vol. 6(2), pp. 1343–1360. <https://doi.org/10.3390/make6020063>.
12. *Akyildiz O., Basarir H., Vezhapparambu V. S., Ellefmo S.* MWD data-based marble quality class prediction models using ML algorithms // *Math Geosci*. 2023, vol. 55(8), pp. 1059–1074. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10061-1>.
13. *Silversides K. L., Melkumyan A.* Machine learning for classification of stratified geology from MWD data // *Ore Geol Revi*. 2022, vol. 142. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104737>.
14. *Komadja G. C., Westman E., Rana, A. et al.* Predicting rock mass strength from drilling data using synergistic unsupervised and supervised machine learning approaches // *Earth Sci Inform*. 2025, vol. 18, 325. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01837-6>.
15. *Ghosh R.* Assessment of rock mass quality and its effects on chargeability using drill monitoring technique. Doctoral thesis, Luleå: University of Technology, Sweden, 2017.
16. *Navarro M. J.* The use of measure while drilling for rock mass characterization and damage assessment in blasting. Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Madrid — E. T. S. I. Minas y Energía (UPM), Spain, 2018.
17. *Ковалевский В. Н., Мысин А. В., Сушкова В. И.* Теоретические аспекты технологии взрывной отбойки блочного камня // *Горные науки и технологии*. 2024, vol. 9(2), pp. 97–104. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-187>.

18. *Афанасьев П. И.* Анализ параметров ударных волн на стенке взрывной полости при преломлении детонационных волн через воздушную и водную среду // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 505–515. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-505-515.
19. *Должииков 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.
20. *Segui J. B., Higgins M.* Blast design using measurement while drilling parameters // International Journal for Blasting and Fragmentation. 2002, vol.6 (3–4), pp. 287–299.
21. *Leighton J. C.* Development of a Correlation between Rotary Drill Performance and Controlled Blasting Powder Factors, Master's Thesis. Vancouver: University of British Columbia, Canada, 1982.
22. *Жариков С. Н.* О способах изучения свойств грунтов для повышения эффективности буровзрывных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2016. — № 6(117). — С. 3–7.
23. *Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Зигангиров Р. Р., Мифтахов А. А., Суворов Ю. И.* Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 231–245.
24. *Ghosh R., Gustafson A., Schunnesson H.* Development of a geological model for chargeability assessment of borehole using drill monitoring technique // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 109, pp. 9–18.
25. *Navarro J., Segarra P., Sanchidrián J. A., Castedo R., Pérez Fortes A. P., Natale M., Lopez L. M.* Application of an in-house MWD system for quarry blasting // Proceedings of the 12th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Fragblast 12, Luleå, Sweden, 11–13 June 2018, H. Schunnesson, D. Johansson (Eds), pp. 203–207.
26. *Safullin R. N., Safullin R. R., Sorokin K. V., Kuzmin K. A., Rudko V. A.* Integral Assessment of Influence Mechanism of Heavy Particle Generator on Hydrocarbon Composition of Vehicles Motor Fuel // International Journal of Engineering. 2024, vol. 37(8), pp. 1700–1706. DOI: 10.5829/ije.2024.37.08b.20.
27. *Поспехов Г. Б., Норова Л. П., Изотова В. А.* Сравнение методов определения гранулометрического состава гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты известняком // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 1729–1742. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1729-1742.
28. *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.
29. *Лигоцкий Д. Н., Долгушин Н. А.* Анализ опыта применения безлюдных технологий при открытой разработке месторождений и перспективы их развития // Горный журнал. — 2025. — № 2. — С. 42–47. DOI: 10.17580/gzh.2025.02.06.
30. *Шабаров А. Н., Носков В. А., Павлович А. А., Черепов А. А.* Понятие геомеханического риска при ведении открытых горных работ // Горный журнал. — 2022. — № 9. — С. 22–28. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.
31. *Kovalsky E., Kongar-Syuryun S., Morgoeva A., Klyuev R., Khayrutdinov M.* Backfill for Advanced Potash Ore Mining Technologies // Technologies. 2025, vol. 13, 60. <https://doi.org/10.3390/technologies13020060>.
32. *Ишейский В. А., Мартынушкин Е. А., Васильев А. С., Смирнов С. А.* Отбор данных по процессу бурения взрывных скважин при формировании баз алгоритмов машинного обучения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 4. — С. 116–133. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_116.

33. Фадеев А. А., Заборский Е. Н., Багдасарян О. Е. Цифровые решения буровзрывной деятельности как способ повышения эффективности, безопасности ведения работ при дроблении горной массы // Уголь. – 2024. – № 1187 (12). – С. 99–102. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12–99–102.

34. Петерс К. И., Рада А. О., Коньков Н. Ю. О подходах к автоматизированной обработке данных при анализе телеметрии бурения взрывных скважин для разработки специализированного программного обеспечения // Взрывное дело. – 2024. – № 144/101. – С. 52–72.

35. Гусев В. Н., Блищенко А. А., Санникова А. П. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 173–179. DOI: 10.31897/PMI.2022.35. **МИАЭ**

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ишейский Валентин Александрович¹ – канд. техн. наук, доцент, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-1007-6562;

Маринин Михаил Анатольевич¹ – канд. техн. наук, доцент, зав. каф. взрывного дела, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-5575-9343;

Петерс Константин Иванович² – заместитель директора по перспективному развитию технологий БВР, e-mail: k.peters@vgroup.one;

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II;

² ООО «ВЗРЫВ ГРУПП».

Для контактов: Ишейский В. А., e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru.

REFERENCES

1. Isheyskiy V., Sanchidrián, J.A. Prospects of Applying MWD Technology for Quality Management of Drilling and Blasting Operations at Mining Enterprises. *Minerals*. 2020, vol. 10, 925. <https://doi.org/10.3390/min10100925>.

2. Aleksandrov V.G. Experimental test of fractional-energy approach adequacy for the parameters of drilling and blasting according to the telemetric data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal Minerals and Mining Engineering*. 2024, no. 4, pp. 97–112 [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-97–112.

3. Navarro J., Sanchidrian J.A., Segarra P., Castedo R., Costamagna E., Lopez L.M. Detection of potential overbreak zones in tunnel blasting from MWD data. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 82, pp. 504–516.

4. Navarro J., Sanchidrian J.A., Segarra P., Castedo R., Paredes C., Lopez L.M. On the mutual relations of drill monitoring variables and the drill control system in tunneling operations. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 72, pp. 294–304.

5. Khorzoughi M.B., Hall R., Apel D. Rock fracture density characterization using measurement while drilling (MWD) techniques. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28(6), pp. 859–864.

6. Akyildiz O., Basarir H., Ellefmo S.L. The development of a lithology prediction model using measurement while drilling data in a quartzite quarry. *Int J Min Reclam Environ*. 2024. <https://doi.org/10.1080/17480930.2024.2362577>.

7. Opanasenko P.I., Isaichenkov A.B. The Blast maker software/hardware complex use in drilling and-blasting designing in Tugnuisky open pit mine. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013, no. S2, pp. 38–57.

8. Tangaev I.A. *Burimost' i vzryvaemost' gornyh porod*, Moscow, Nedra, 1978, 184 p. [In Russ].

9. Kriukov G. M. Physics of rock breaking when drilling and blasting. Vol. 1. Moscow, Gornaia kniga Publishing, 2006. [In Russ].
10. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1965, p. 245. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7.
11. Goldstein D. M., Aldrich C., O'Connor L. A review of orebody knowledge enhancement using machine learning on open-pit mine measure-while-drilling data. *Mach Learn Knowl Extr*. 2024, vol. 6(2), pp. 1343–1360. <https://doi.org/10.3390/make6020063>.
12. Akyildiz O., Basarir H., Vezhapparambu V. S., Ellefmo S. MWD data-based marble quality class prediction models using ML algo rithms. *Math Geosci*. 2023, vol. 55(8), pp. 1059–1074. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10061-1>.
13. Silversides K. L., Melkumyan A. Machine learning for classifica tion of stratified geology from MWD data. *Ore Geol Revi*. 2022, vol. 142. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104737>.
14. Komadja G. C., Westman E., Rana A. et al. Predicting rock mass strength from drilling data using synergistic unsupervised and supervised machine learning approaches. *Earth Sci Inform*. 2025, vol. 18, 325. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01837-6>.
15. Ghosh R. Assessment of rock mass quality and its effects on chargeability using drill monitoring technique. Doctoral thesis, Luleå: University of Technology, Sweden, 2017.
16. Navarro M. J. The use of measure while drilling for rock mass characterization and damage assessment in blasting. Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Madrid E. T. S. I. Minas y Energía (UPM), Spain, 2018.
17. Kovalevsky V. N., Mysin A. V., Sushkova V. I. Theoretical aspects of block stone blasting method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, no. 9(2), pp. 97–104. [In Russ]. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-187>.
18. Afanasev P. I. Analysis of shock wave parameters at the explosive cavity wall during refraction of detonation waves through the air and water. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, no. 15(3), pp. 505–515. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-505-515.
19. 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.
20. Segui J. B., Higgins M. Blast design using measurement while drilling parameters. *International Journal for Blasting and Fragmentation*. 2002, vol. 6 (3–4), pp. 287–299.
21. Leighton J. C. Development of a Correlation between Rotary Drill Performance and Controlled Blasting Powder Factors, Master's Thesis. Vancouver: University of British Columbia, Canada, 1982.
22. Zharikov S. N. On methods for studying soil properties to improve the efficiency of drilling and blasting operations. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016, no. 6(117), pp. 3–7. [In Russ].
23. Vinogradov Y. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Miftakhov A. A., Suvorov Y. I. Optimization of specific energy consumption for rock crushing by explosion at deposits with complex geological structure. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 231–245. [In Russ].
24. Ghosh R., Gustafson A., Schunnesson H. Development of a geological model for chargeability assessment of borehole using drill monitoring technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 109, pp. 9–18.
25. Navarro J., Segarra P., Sanchidrián J. A., Castedo R., Pérez Fortes A. P., Natale M., Lopez L. M. Application of an in-house MWD system for quarry blasting. *Proceedings of the 12th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Fragblast 12, Luleå, Sweden, 11–13 June 2018, H. Schunnesson, D. Johansson (Eds), pp. 203–207.

26. Safullin R. N., Safullin R. R., Sorokin K. V., Kuzmin K. A., Rudko V. A. Integral Assessment of Influence Mechanism of Heavy Particle Generator on Hydrocarbon Composition of Vehicles Motor Fuel. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37(8), pp. 1700–1706. DOI: 10.5829/ije.2024.37.08b.20.

27. Posphehov G. B., Norova L. P., Izotova V. A. Comparing the methods of grain size analysis of gypsum-containing sulfuric acid wastes neutralized with limestone. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1729–1742. [In Russ]. DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1729-1742>.

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

29. Ligotsky D. N., Dolgushin N. A. Analysis of experience in the use of unmanned technologies in open pit mining and prospects for their development. *Mining Journal*. 2025, no. 2, pp. 42–47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.02.06.

30. Shabarov A. N., Noskov V. A., Pavlovich A. A., Cherepov A. A. Concept of geomechanical risk in open pit mining. *Mining Journal*. 2022, no. 9, pp. 22–28. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.

31. Kovalsky E., Kongar-Syuryun C., Morgoeva A., Klyuev R., Khayrutdinov M. Backfill for Advanced Potash Ore Mining Technologies. *Technologies*. 2025, vol. 13, 60. <https://doi.org/10.3390/technologies13020060>.

32. Isheyskiy V. A., Martynskin E. A., Vasilyev A. S., Smirnov S. A. Selection of data on drilling-and-blasting in creation of databases of machine learning algorithms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 116–133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_116.

33. Fadeev A. A., Zaborskiy E. N., Bagdasaryan O. E. Digital solutions for drilling and blasting operations as a way to improve efficiency, safety of operations and reduce seismic impact during rock crushing. *Ugol'*. 2024, no. 12, pp. 99–102. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-99-102.

34. Petyers K. I., Rada A. O., Konkov N. Yu. O podkhodakh k avtomatizirovannoy obrabotke dannykh pri analize telemekhni bureniya vzryvnykh skvazhin dlya razrabotki spetsializirovannogo programmogo obespecheniya. *Vzryvnoe delo*. 2024, no. 144/101, pp. 52–72.

35. Gusev V. N., Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodesic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 173–179. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Isheyskiy V. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-1007-6562,

*Marinin M. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of the Blasting department, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-5575-9343;

*Peters K. I.*², Deputy Director for Prospective Development of Drilling and Blasting Technologies, e-mail: k.peters@vgroup.one;

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia;

² LLC «VZRYV GRUPP» 650000, Kemerovo, Russia.

Corresponding author: *Isheyskiy V. A.*, Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 14.08.2025; получена после рецензии 10.09.2025; принята к печати 10.10.2025.

Received by the editors 14.08.2025; received after the review 10.09.2025; accepted for printing 10.10.2025.

