

ОТБОР ДАННЫХ ПО ПРОЦЕССУ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БАЗ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В.А. Ишейский¹, Е.А. Мартынушкин², А.С. Васильев¹, С.А. Смирнов³

¹ Санкт-Петербургский Горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: lsheyskiy_VA@pers.spmi.ru

² ООО «ВЗРЫВ ГРУПП», Киселевск, Россия

³ ООО «Ресурс», Новокузнецк, Россия

Аннотация: Представлен структурированный анализ в области использования методов обработки и верификации данных, полученных в процессе бурения взрывных скважин, описаны основные особенности сбора «чистых» данных с целью формирования «материнской» обучающей базы для ее последующего использования в алгоритмах машинного обучения. Основной целью исследования является создание алгоритма, использующего методы машинного обучения, который на основе «чистых» входных данных, относящихся к конкретным условиям, может коррелировать, обрабатывать, выбирать информацию, получаемую с датчиков регистрации параметров процесса бурения, и использовать ее для дальнейшего расчета различных характеристик горных пород, прогнозирования оптимальных параметров буровзрывных работ и результатов взрыва. Представлен анализ измеренных параметров бурения с целью определения наличия или отсутствия отклика на изменение типов и видов горных пород, пересечение зон структурных нарушений и неоднородностей в массиве. Приведены результаты исследования и сопоставления геологической информации, полученной в результате сканирования откосов поверхностей уступов, образованных при контурном взрывании, а также результатов видеоэндоскопии взрывных скважин с показателями энергоемкости бурения горных пород. На основании полученных результатов представлены будущие направления исследований по созданию обучающих алгоритмов, направленных на расчет гранулометрического состава взорванной горной массы с учетом не только факторов, связанных с проведением буровзрывных работ, но и состоянием пород в массиве.

Ключевые слова: добыча полезных ископаемых, бурение скважин, свойства горных пород, мониторинг, система MWD, верификация данных, фильтрация данных, энергоемкость бурения, блочная модель.

Благодарность: Авторский коллектив благодарит Совет по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации за поддержку проекта и выделение финансирования на научные исследования в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-3770.2021.4).

Для цитирования: 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.

Selection of data on drilling-and-blasting in creation of databases of machine learning algorithms

V.A. Isheyskiy¹, E.A. Martinyskin², A.S. Vasilyev¹, S.A. Smirnov³

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru

² ООО «VZRYV GRUPP», Kiselevsk, Russia

³ ООО «Resurs», Novokuznetsk, Russia

Abstract: The article offers a structured analysis of methods for processing and verification of data obtained during drilling-and-blasting, with the description of features of collecting pure data to create a mother database to be used in machine learning algorithms. The main objective of the study is to create a machine learning algorithm which, based on the pure inputs concerned with specific conditions, can correlate, select and process data obtained from detectors of drilling parameters, for the further calculation of different characteristics of rocks, prediction of optimal drilling-and-blasting parameters and blasting results. In this article, the measured drilling parameters are analyzed with a view to define response, if any, to change of the type or kind of rocks, as well as to intersection of zones of structural damage and discontinuity in rock mass. The comparison of geological information of slope scanning after perimeter blasting and video image endoscopy data from blastholes with the drilling energy consumption data is presented in the article. Based on the results, the article identifies some trends of the future studies aimed to create learning algorithms of particle size distribution in broken rock disintegration with regard to factors connected both with drilling-and-blasting and rock mass condition.

Key words: mineral mining, drilling, rock property, monitoring, MWD system, data verification, data filtration, drilling energy consumption, block model

Acknowledgements: The team of the authors is grateful to the Council for Grants of the President of the Russian Federation for young Russian scientist and leading scientific schools for the research project support in the framework of the governmental sponsorship of young Russian candidates of sciences, Grant MK-3770.2021.4.

For citation: Isheyskiy V. A., Martinyskin 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;(4):116-133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_116.

Введение

Все виды деятельности, связанные с исследованием, использованием и оценкой информации о геологических объектах, характеризуются высокой степенью неопределенности относительно свойств, особенностей и структуры массива горных пород.

Многие исследователи используют методы машинного обучения для решения различных проблем и задач горнодобывающей промышленности: выбора горного оборудования, оценки геомеха-

нических свойств и геологических характеристик горного массива [1], классификации горных пород, определения параметров буровзрывных работ, оценки безопасности взрывных работ и др. Подробный обзор применения методов машинного обучения для решения задач горного производства представлен в статье [2].

Прогнозирование гранулометрического состава взорванной горной массы на основе учета данных по процессу бурения скважин является актуальной про-

изводственной задачей. Современные методы прогнозирования гранулометрического состава, основанные на теоретических и эмпирических моделях, и даже методах машинного обучения, используют только параметры буровзрывных работ и существующие классификации горных пород по прочности и структурным особенностям, которые не учитывают всю структуру и неоднородность массива, подлежащего взрыву. В отличие от этого, технология измерения параметров во время бурения позволяет собирать данные по каждой пробуренной скважине и обеспечивает облако выборки по конкретным измеренным показателям для последующего прогнозирования гранулометрического состава породы в развале. Блочная модель, построенная на основе полученной информации, может учитывать прочностные характеристики и все структурные нарушения, обнаруженные в массиве горных пород, что позволяет более подробно рассмотреть влияние литологии и состояния массива на окончательный результат.

Для преодоления трудностей в горном деле начинают применяться методы «искусственного интеллекта», «нейронных сетей», «нечеткой логики» и т.д.

Однако входной информацией в большинстве случаев являются простые наборы параметров, включающие в себя различные измеренные (напрямую и косвенно) и рассчитанные величины. Набор данных по бурению, собранных с помощью технологии Measurement While Drilling (MWD), в свою очередь, является более объемным и имеет сложную взаимосвязь входящих в него параметров по сравнению, например, с теми же геологическими характеристиками, полученными альтернативными методами. В этой связи работа алгоритмов машинного обучения для аналитики получаемой информации усложняется, так как

необходимо учитывать большое число взаимовлияющих факторов, основываясь на зависимых и независимых параметрах, дающих реальный отклик процесса бурения на изменения в массиве [3].

В этой связи при использовании методов «машинного обучения», «нейронных сетей» особое внимание следует уделять верификации полученных данных, которые являются основной обучающей информацией при формировании «материнского» алгоритма обучения. Процесс верификации данных после их соответствующей обработки и нормализации очень важный и ответственный этап, который определяет последующий результат. При проведении итераций обучения, закладывая верифицированную информацию как основу для обучения, можно снизить уровень ошибки и увеличить «чистоту» и точность предсказываемых результатов.

Сформулировать решаемую задачу исследования можно следующей последовательностью: «Данные по процессу бурения (MWD)» — «физико-механические свойства горных пород и их структура» — «параметры буровзрывных работ» — «гранулометрический состав взорванной горной массы» с непосредственной оценкой качества работы указанной последовательности на каждом этапе (рис. 1).

При использовании средств и методов машинного обучения очень важным моментом является первоначальная обработка измеренных параметров, дающим реальный отклик на изменение в массиве, а не в технологическом процессе бурения, которые в дальнейшем будут обеспечивать «чистоту» данных и являться основой для формирования «материнской» базы на этапе работы части алгоритма «Данные MWD» — «физико-механические свойства горных пород и их структура» [4].

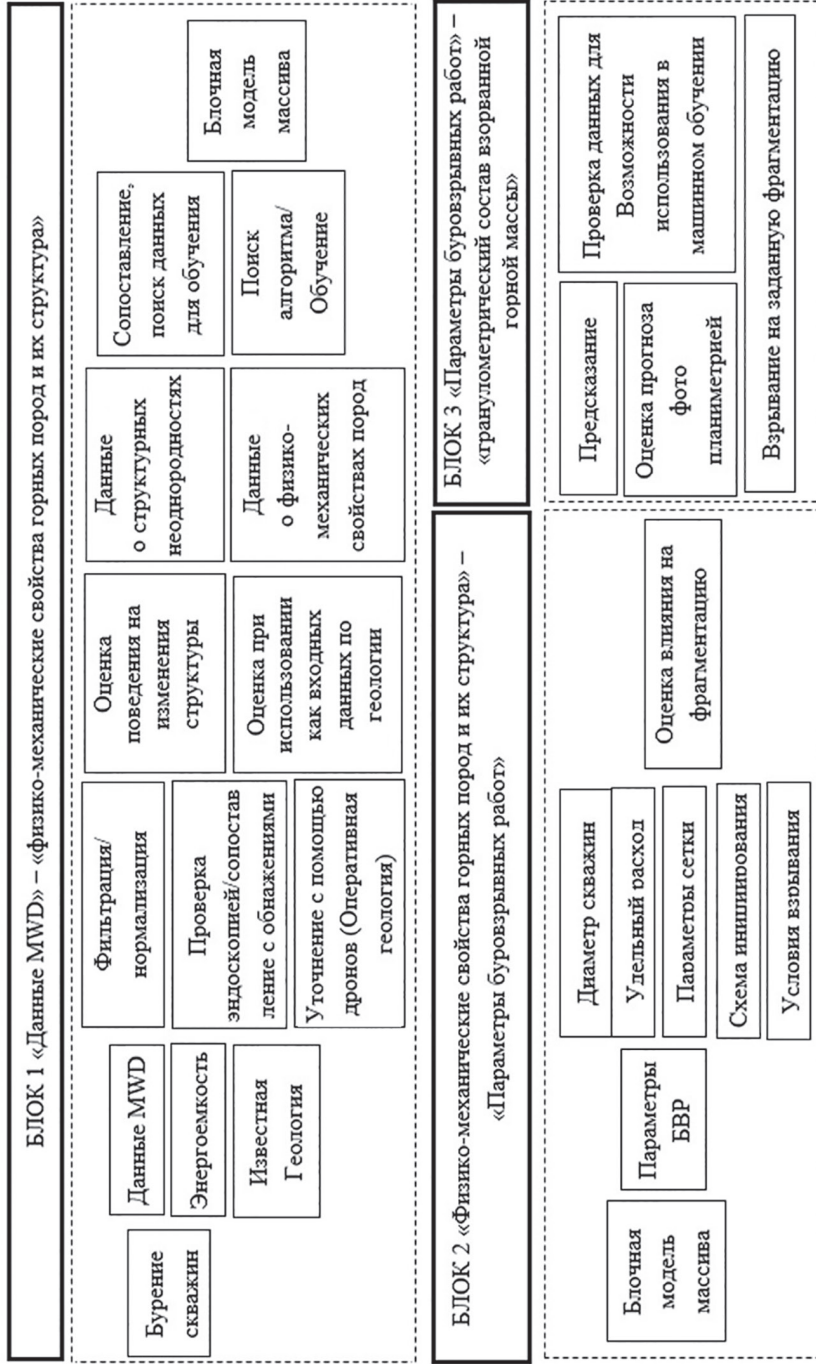


Рис. 1. Концепция исследования

Fig. 1. Research concept

Методы исследований

Для сбора «чистых» данных по бурению необходимо убедиться в том, что настройка станка, на котором установлена аппаратура измерения, дает реальный отклик на изменение типа и структуры горных пород. Даже станки с одинаковым типом бурового инструмента, но различных моделей могут давать отличные результаты. На одном из ведущих угледобывающих предприятий ООО «Ресурс» (Россия, Кузбасский регион) на участках недр «Кыргайский средний» и «Новоказанский 2» была собрана информация по процессу бурения при проходке взрывных скважин для последующего анализа и верификации (рис. 1). В ходе этого исследования было исследовано 478 скважин:

245 скважин из 17 блоков без обнажения горных пород (участок «Новоказанский 2»), 233 скважины из 13 блоков с горными породами, вскрытыми взрывом (участок «Кыргайский средний»).

Характеристики горных пород по участкам недр представлены в табл. 1. Указанные участки были выбраны ввиду наличия обнажений по геологии в результате постановки бортов в конечном положении и в связи с наличием явных переходов и переслоек различных литотипов. Далее будут рассмотрены два примера отбора данных по участкам.

Контурный ряд скважин был пробурен на глубину 33 м. Для исследования выбраны скважины № 469–483 (отмечено красной зоной на рис. 2) по блоку № К 67-78 горизонта +120,0...+121,0

Таблица 1

Коэффициенты крепости и буримости пород на исследуемых участках Hardness factors and drillability indexes of rocks in test sites

Участок горных работ	Категория горных пород по «Единой классификации»	Крепость пород по шкале проф. М.М. Протождяконова (f)		
		уголь	мелко- и крупнозернистые алевролиты	крупнозернистый светло-серый песчаник
Кыргайский средний	VIII – X	3	5 – 6	6
Новоказанский 2	III – IV			

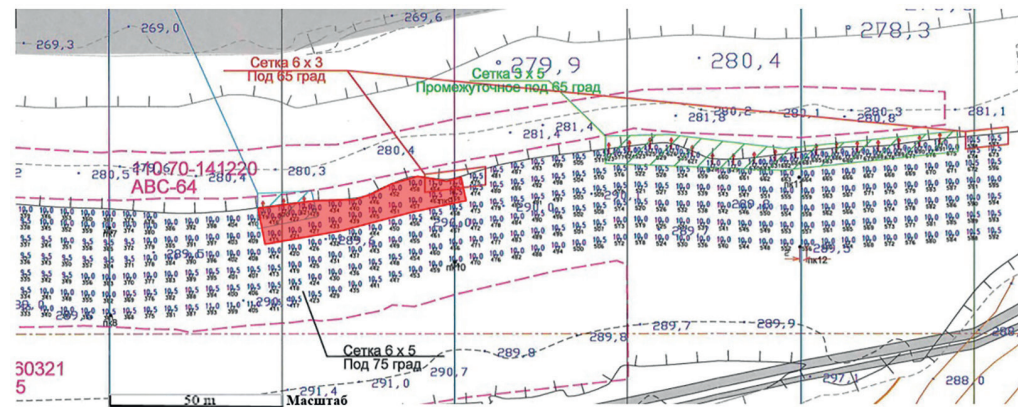


Рис. 2. Расположение исследуемых скважин № 469–483 контурного ряда (отмечено красной зоной) по блоку № К 67-78 горизонта +120,0...+121,0 между профильными линиями 12+50 – 15+50 на участке «Кыргайский средний»

Fig. 2. Physical layout of perimeter blastholes Nos. 469–483 (red-color area) in block K 67–78 on Level +120.0...+121.0 between profiles 12+50 – 15+50 in Kyrgai sredni site

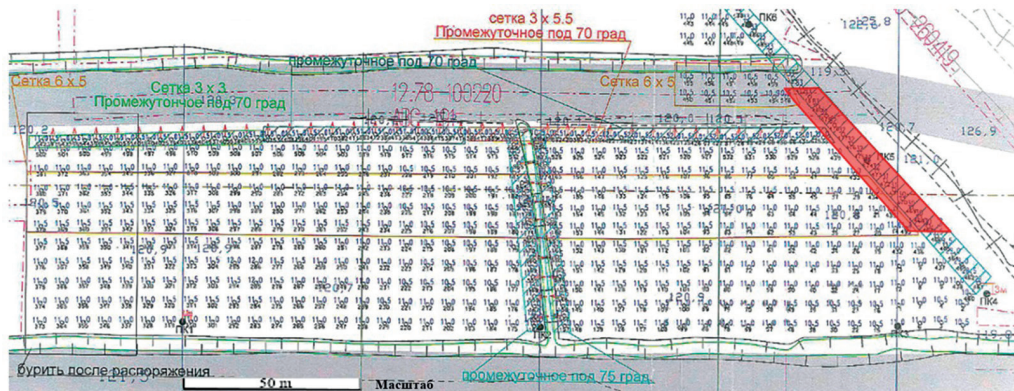


Рис. 3. Расположение исследуемых скважин № 415 – 469 (отмечено красной зоной) по блоку № Н 58-70 горизонта +285,8... +291,2 между профильными линиями 18 – 24 на участке «Новоказанский 2»
 Fig. 3. Physical layout of perimeter blastholes Nos. 415–469 (read-color area) in block N 58–70 on Level +285.8... +291.2 between profiles 18–24 in Novokazansky 2 site

между профильными линиями 12+50 – 15+50 на участке «Кыргайский средний» и скважины № 415–469 (отмечено красной зоной на рис. 3) по блоку № Н 58-70 горизонта +285,8... +291,2 между профильными линиями 18 – 24 на участке «Новоказанский 2». Основные скважины взрывааемых блоков забурены на глубину от 10,0 до 11,5 м. Диаметр скважин составлял 170 мм.

Визуальный анализ контурных скважин после проведения взрывных работ позволяет регистрировать зоны структурной неоднородности в массиве горных пород, понимать изменение литологии и сравнивать полученную информацию по процессу бурения с фактическим геологическим строением. Это также позволяет идентифицировать хорошо видимые части взрывных скважин с минимальным количеством трещин, вызванных взрывом, и сформировать однозначное понимание, как записанные параметры бурения реагируют на изменения в массиве горных пород, сравнивая траектории контурных скважин с изменениями в массиве горных пород в зависимости от глубины. В ходе исследования были специально выбраны участки откоса с горными породами с хорошим и плохим состоянием.

Одним из основных показателей, используемых для прочностной характеристики пород, является энергоёмкость бурения [5]. Этот параметр позволяет понять, что происходит в массиве горных пород при отсутствии обнажения горных пород. Он рассчитывается на основе данных по бурению и корректируется с учетом износа бурового инструмента и операций по очистке скважин и т.д.

Интерпретация показателя энергоёмкости бурения в сочетании с доступной геологической информацией и данными по процессу бурения может дать ценную информацию о фактической геологической структуре массива. Однако необходимо подтвердить надежность полученных значений энергоёмкости бурения, чтобы исключить возможность искажения или задержек измерения.

В этом исследовании возможность использования параметра энергоёмкости бурения для идентификации литологии и структуры горных пород на основе существующих геологических отчетов была проверена двумя методами:

- сравнение блочной модели по данным энергоёмкости бурения с результатами сканирования стенок уступа БПЛА после контурных взрывов (участок «Кыргайский средний»);

- видеоэндоскопия взрывных скважин в блоках без обнажения горных пород (участок «Новоказанский 2»).

Полученная информация использовалась, чтобы подтвердить корреляцию между полученными значениями энергоемкости бурения и фактическим известным составом горных пород, а также сформировать основу для сбора геологической информации в реальном времени для понимания реакции параметров по процессу бурения на изменения в массиве горных пород.

Сбора данных и методы исследования можно разбить на следующие этапы:

- сбор данных по процессу бурения;
- расчет энергоемкости бурения и проведение эндоскопии скважин;
- сопоставление полученных результатов и анализ отклика бурения.

Сбор данных по процессу бурения

Информация по процессу бурения собиралась с двух типов скважин (основных и скважин контурного ряда) со станков вращательного бурения «Sandvik» D 50 KS и «Epiroc» DML LP-1200, оборудованных системой измерения во время бурения «VG Drill» с высокоточным позиционированием и наведением на проектную траекторию бурения скважин. Система мониторинга бурения «VG Drill» извлекает и хранит информацию по процессу бурения в режиме реального времени в формате «xml» и передает в специализированное программное обеспечение ГИС «Геомикс» для дальнейшей интерпретации данных. Записанная информация включала дату бурения, координаты устья скважины с отметкой высоты и ее номер согласно проекту на бурение, глубину бурения, момент вращения, скорость бурения, скорость вращения, осевое давление, давление воздуха. Интервал выборки измеряемых параметров бурения был установлен в пределах 5 см.

Для анализа были использованы не все измеренные значения по бурению ввиду нескольких причин. Например, из-за недостоверных данных, записанных в начале каждой скважины в верхней части уступа, который в большинстве случаев является нарушенным и может быть покрыт рыхлыми обломками породы или мелкой фракцией вследствие плохой зачистки поверхности уступа до целика, иметь более слабые физико-механические свойства после воздействия предыдущих взрывов. Как правило, система контроля бурения осуществляет забуривание устья скважин с пониженной величиной давления подачи. Записанные параметры бурения в начале устья скважины, не связанные с характеристиками горного массива, не подлежат анализу и не отражают реакцию бурения на реальные изменения в массиве. Данные, записанные с систем измерения во время бурения при замене буровых штанг, также должны быть исключены из анализа ввиду принудительного изменения параметров, вызванных буровой установкой. Ошибочные и нереалистичные значения, например, отрицательные или аномально высокие значения для скорости бурения или давления не репрезентативны и не являются откликом на реакцию бурения на изменения в буримых породах. Перечисленные данные должны быть удалены при анализе [6, 7]. Система «VG Drill» имеет набор базовых инструментов, позволяющих избежать включения подобной ошибочной информации и отфильтровать входные параметры в автоматическом режиме (исключить запись измерения с операций подъема, повторного прохода, холостого хода и т.д.).

Кроме того, на основании частотного анализа и практических соображений на каждый зарегистрированный параметр был наложен консервативный предел (табл. 2).

Таблица 2

Интервалы фильтруемых данных
Data filtration intervals

Записанные параметры	Единицы измерения	Диапазон записанных данных	Лимиты фильтра
Скорость вращения	об/мин	[0; 169]	[0; 161]
Скорость бурения	м/мин	[-0,2; 18,7]	[0,1; 6]
Момент вращения	кН м	[0; 12,1]	[0,6; 9,3]
Осевое давление	кН/м ²	[0; 13 700]	[1380; 12 750]

Консервативные пределы фильтрации исключили большую часть неверных данных. Однако они также могли удалить некоторые значения, которые отражали фактическую реакцию на бурение, но редко встречались в наборе данных. Следует отметить, что большие объемы собранной информации по процессу бурения гарантируют, что важные геомеханические особенности все равно будут идентифицированы, даже если несколько правильных записей будут отфильтрованы.

На рис. 4 показаны средние значения скорости бурения, скорости вращения

забойного давления и крутящего момента, рассчитанные на каждые 0,5 м глубины скважины. Этот анализ проводился для определения необходимости корректировки записанных параметров по глубине. В случае скважинного бурения средние значения скорости бурения, скорости вращения и осевого давления демонстрируют лишь незначительные изменения в зависимости от глубины. С другой стороны, значения среднего крутящего момента неуклонно увеличивались с глубиной.

Добавление новой штанги через каждые 9 м глубины бурения приводит к

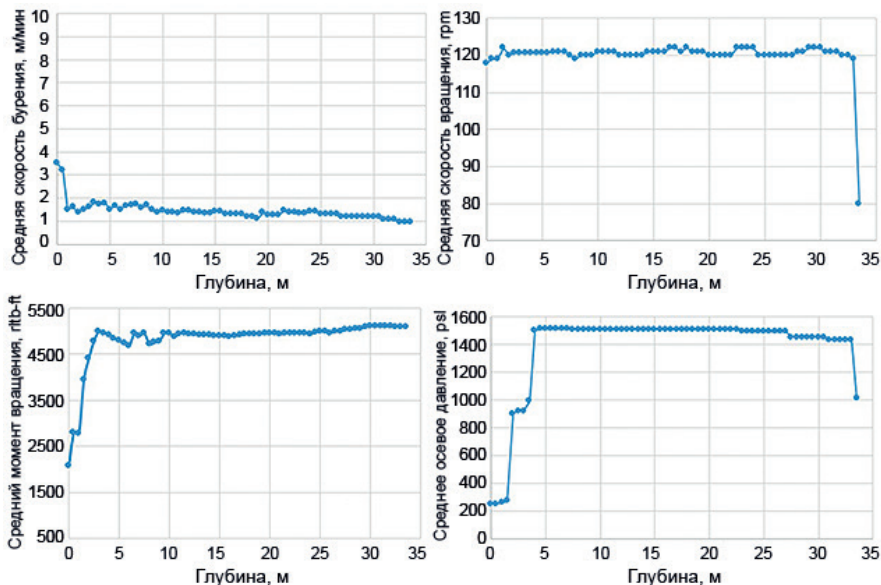


Рис. 4. Средние значения данных по процессу бурения в зависимости от глубины

Fig. 4. Average data of drilling versus depth

скачкообразному изменению функции крутящего момента, что можно объяснить необходимостью увеличения давления на буровой инструмент для компенсации дополнительной энергии, необходимой для вращения из-за увеличенной массы буровой колонны. Коррекция сигнала крутящего момента по глубине производилась в соответствии со следующими рекомендациями [8]:

$$T_{\text{норм}}^i = [T^i - T_{\text{расп}}^i] + T_{\text{расп}}^1, \quad (1)$$

при $i = 1, 2 \dots N$,

где i — каждое измерение в диаграмме измерений по скважине; N — количество измерений; $T_{\text{расп}}^i$ — полиномиальная посадка с глубиной по скважине среднего крутящего момента; T_1^1 — точка пересечения посадки.

Расчет энергоёмкости бурения

Концепция энергоёмкости бурения была введена Р. Тилом [5] как работа, необходимая для бурения единичного объема породы. При вращательном бурении работа выполняется как за счет усилия долота, так и крутящего момента. Р. Тил вывел уравнение для расчета энер-

гоемкости, которое впоследствии использовалось многими исследователями в своих работах [9–13].

С учетом единиц измерения параметров, получаемых на буровой установке, энергоёмкость бурения можно описать следующим образом [10]:

$$E = F/S + (2 \cdot RS \cdot T)/(S \cdot PR), \quad (2)$$

где F — нагрузка на буровую коронку, кН; S — поперечное сечение ствола скважины, м²; RS — частота вращения долота, об/мин; T — крутящий момент долота, кН м; PR — скорость бурения, м/мин; $F/S = \text{кН/м}^2$ (данные получены с датчиков).

Средние значения интервалов рассчитываются для приращения глубины 0,1 м на основе среднего значения для определенного сегмента глубины в скважине. Скорость проникновения для сегментов рассчитывалась как:

$$PR = S_l^i / (N_l^i / T_l^i), \quad (3)$$

где S_l^i — длина отрезка, м; N_l^i — интервалы времени для N сегментов (мин).

Координаты линий сканирования, кровли и траектории ствола скважины

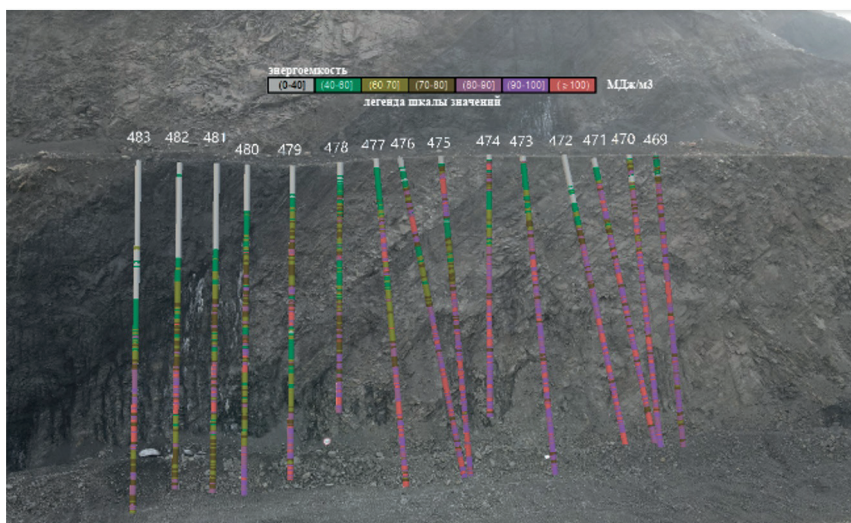


Рис. 5. Распределение энергоёмкости бурения по скважинам контурного ряда
Fig. 5. Drilling energy consumption in perimeter row blastholes

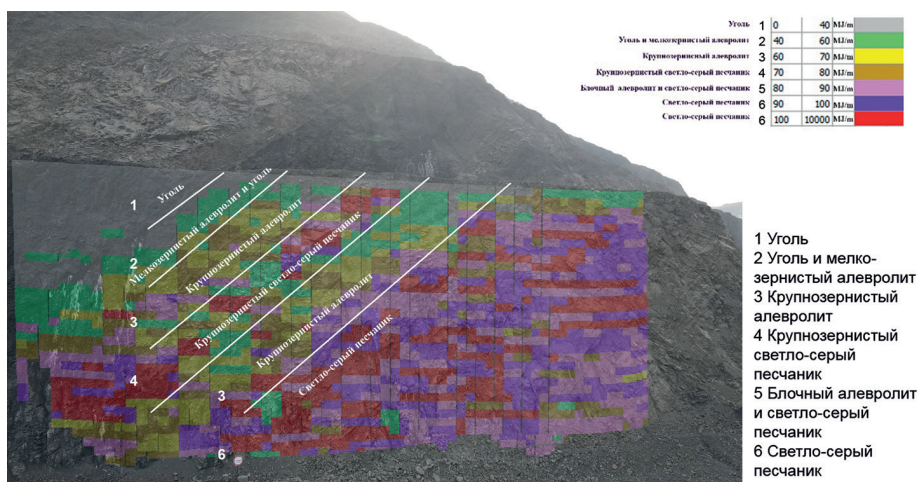


Рис. 6. Блочная модель энергоемкости бурения взрывных скважин в контурном ряду, построенная в программе ГИС «Geomix»

Fig. 6. GIS Geomix model of drilling energy consumption in perimeter row blastholes

были сопоставлены друг с другом для сравнения вариаций геологических и структурных изменений с измеренными параметрами бурения, энергоемкостью бурения (рис. 5) и блочной моделью (рис. 6), построенной в ГИС «Геомикс». Модель основана на результатах расчета энергоемкости бурения по глубине взрывных скважин в контурном ряду. Затем участки между скважинами по их высоте были соединены методом интерполяции и заданием предварительной сетки для объединения данных. После этого было произведено усреднение показателей энергоемкости бурения, выбрана переменная шкала для разделения усредненного показателя на блоки, присвоены координаты и построена блочная модель.

Данные были нанесены на график и сопоставлены с информацией по процессу бурения, зависящими от глубины, чтобы выявить фактическую реакцию на бурение, в то время как области, показывающие сходство в наборах измеренных значений, сравнивались с результатами сканирования уступа. Поведение данных MWD варьировалось в зависимости от наличия или отсутствия структур-

турных неоднородностей, прослоек и переходов горных пород. На рис. 6 показан пример распределения энергоемкости для скважин № 469—483 в предварительно разделенном ряду блока № К 67-78 в сравнении с фотографией поверхности уступа. Анализ представленных фотографий позволил увидеть, что траектории скважин № 479—475 пересекали слой алевролита. Скважины № 479, 477, 476 и 475 в разрезе этого прослоя характеризовались высокими значениями энергоемкости, которые соответствовали породам этого участка.

Построенная блочная модель полностью отражала направление падения геологических разновидностей и соответствовала реальной слоистости пород. Это хорошо видно при совмещении блочной модели со сканированной частью откоса уступа.

Видеоэндоскопия скважин

Блочная модель была проанализирована на предмет совпадения с фактической реакцией бурения и отсутствия задержек при измерении параметров бурения посредством исследования взрывных скважин с помощью видеоэндоско-

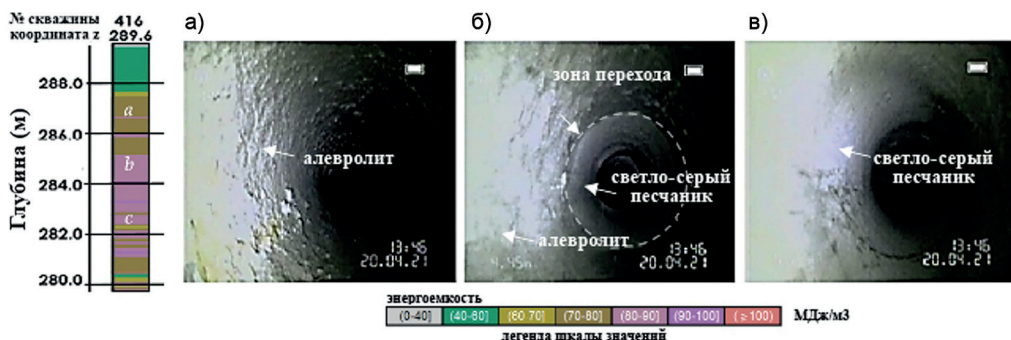


Рис. 7. Результаты видеоэндоскопии скважины № 416 по блоку № Н 58-70 горизонта +285,8... +291,2 на участке «Новоказанский 2», соотнесенные с профилем по энергоемкости: зона преобладания алевролитов (а); зона перехода песчанников и алевролитов (б); зона преобладания песчанников (в)

Fig. 7. Video image endoscopy data in blasthole No. 416 in block N 58–70 on Level +285.8... +291.2 in Novokazansky 2 site in correlation with energy consumption profile: zone of mostly siltstone (a); zone of sandstone and siltstone alternation (b); zone of mostly sandstone (v)

пии. В определенных случаях видеоэндоскопия помогает определить наличие неоднородностей, нарушений и переходов в массиве горных пород [14, 15].

В районе скважин № 415 – 469 блока № 58 – 70 на участке «Новоказанский 2» показатели энергоемкости бурения указали на четкий переход между разными типами пород. Эти скважины были выбраны для видеоэндоскопической съемки с целью проверить реакцию бурения на изменение геологических типов горных пород. Данные энергоемкости для блока № 58 – 70 на уровне +285,8... +291,2 представлены на рис. 7.

Как видно из представленных данных, четкий переход по энергоемкости бурения наблюдается в районе скважин № 416 – 428 (рис. 8). Фиолетовым цве-

том показаны породы с относительно высокими показателями энергоемкости.

Анализ сопоставления результатов видеоэндоскопии и показателей по энергоемкости бурения продемонстрировал отсутствие запаздывания передаваемых данных от системы измерения по процессу бурения при сопоставлении глубин измерений и наличие реального отклика на изменения в массиве.

Анализ полученных результатов и обсуждение

Измеренные данные были проверены на предмет их реакции при бурении пород с наличием открытых и частично открытых трещин. Наиболее значимыми параметрами для оценки отклика бурения являлись скорость проходки [16,

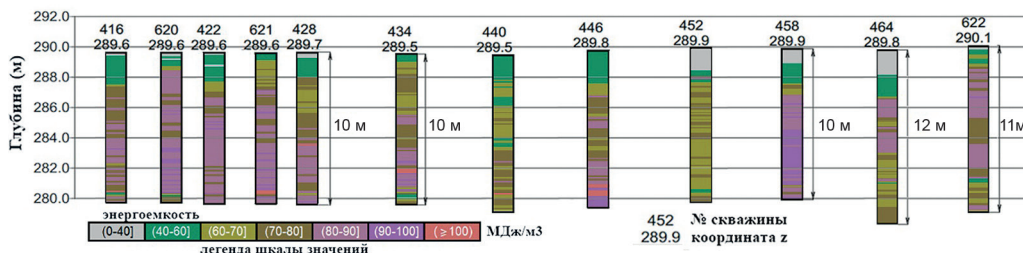


Рис. 8. Профиль энергоемкости бурения скважин № 416 – 428 блока № 58–70

Fig. 8. Drilling energy consumption profile for blastholes Nos. 416–428 in block No. 58–70

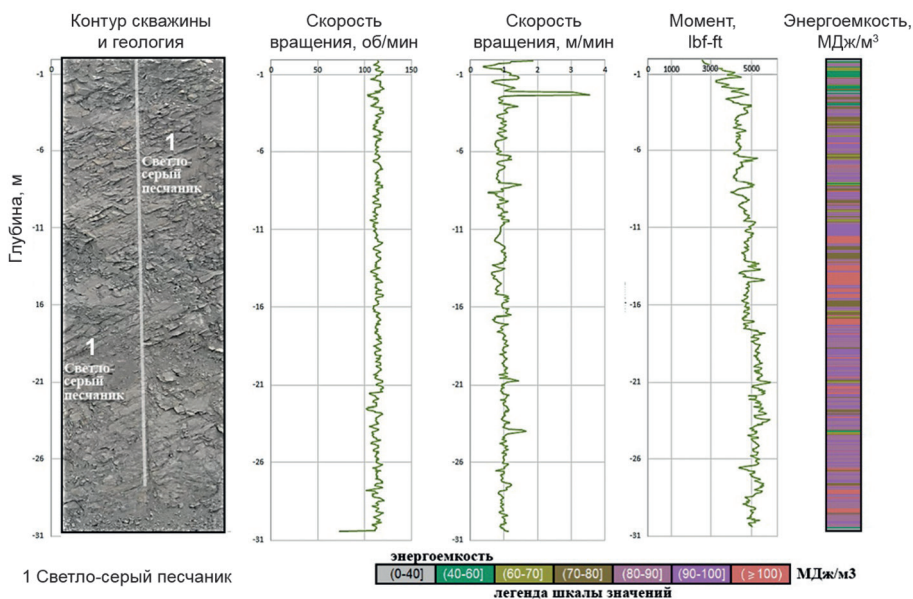


Рис. 9. Графики зависимости данных по процессу бурения от глубины для скважины № 469 блока № К 67-78

Fig. 9. Plots of drilling data versus depth for blasthole No. 469 in block K 67-78

17] и крутящий момент [18]. В свою очередь, скорость проходки и крутящий момент могут отражать как геологические изменения, так и наличие зон структурных неоднородностей [19]. Как показывает практика, в мягких породах скорость проходки при бурении достаточно высока, а крутящий момент относительно низкий. В крепких и весьма крепких породах реакция бурения обратная, скорость проходки ниже, а крутящий момент выше. Таким образом, зоны структурных неоднородностей могут быть выявлены и установлены по данным бурения в зависимости от длительности и периодичности совокупности показателей. Некоторые результаты по оценке реакции бурения на изменения в массиве представлены ниже.

Рис. 9 показывает поведение данных по процессу бурения, когда скважина бурится по породам с закрытыми трещинами, трещинами с малым раскрытием. В этих условиях скорость бурения и осевое давление незначительно реагируют

на трещины, дислокации и пустоты, пересекающие скважины. Измеренные параметры показывают небольшое увеличение своих значений, когда в процессе бурения встречаются указанные выше нарушения. Поскольку раскрытие перечисленных неоднородностей не очень заметно, увеличение параметров практически не наблюдается. Среднее значение скорости проходки составляет 1 м/мин и увеличивается примерно до 1,5 м/мин при пересечении неоднородностей и переслоек (пик на этапе забуривания не берется во внимание). Явных изменений в значениях графика давления вращения практически не наблюдается.

На рис. 10 показан другой тип ответа данных по процессу бурения, обозначенный областью зашумления с колебаниями по всем измеряемым параметрам бурения. Представленный график указывает на то, что такое поведение возникает, когда есть зоны нарушения, трещиноватости или полости, в местах

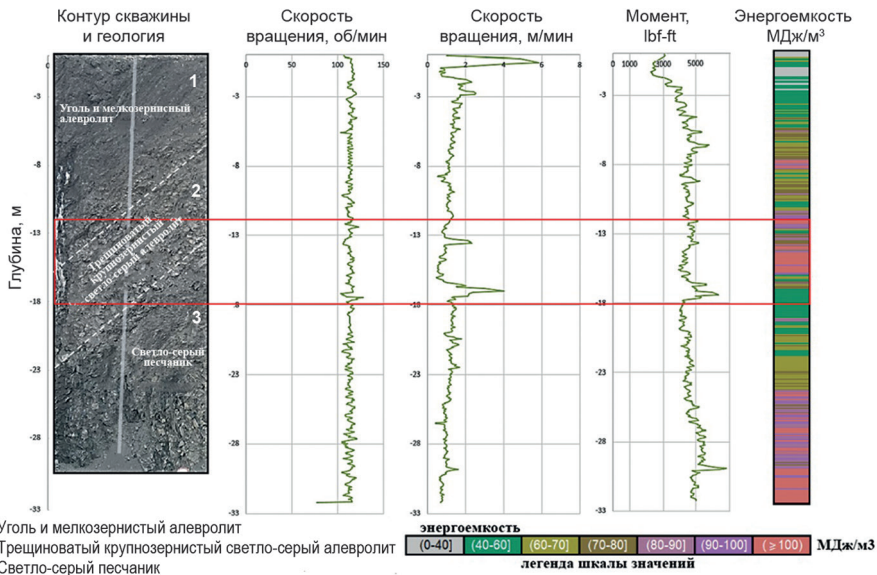


Рис. 10. Графики зависимости данных по процессу бурения от глубины для скважины № 479 блока № К 67–78

Fig. 10. Plots of drilling data versus depth for blasthole No. 479 in block K 67–78

отсутствия четко читаемого следа от контурной скважины.

Колебания данных в этом случае длятся дольше, чем колебания при пе-

реслаиваниях или смене пород (скважина № 479). Это может быть вызвано наличием трещиноватых зон или весьма нарушенного материала, из-за которого

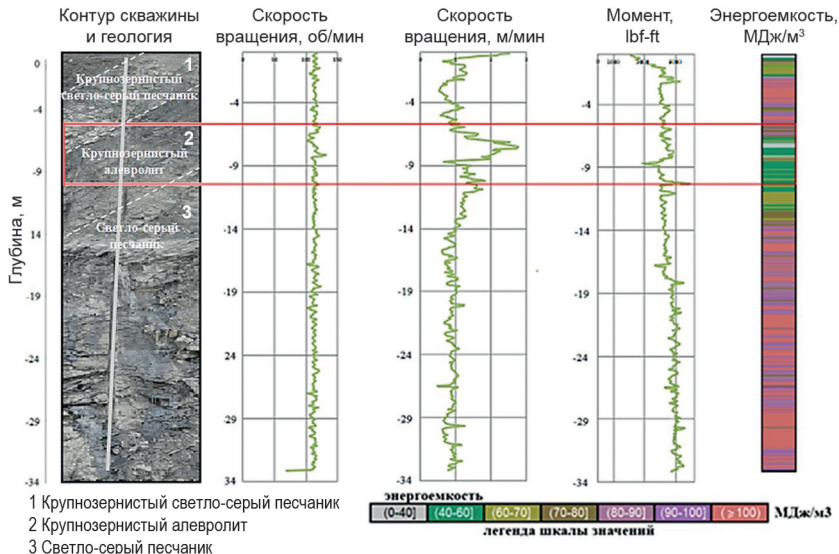


Рис. 11. Графики зависимости данных по процессу бурения от глубины для скважины № 475 блока № К 67–78

Fig. 11. Plots of drilling data versus depth for blasthole No. 475 in block K 67–78

параметры бурения так сильно колеблются. Анализ данных для скважины № 479, представленной на рис. 10, показывает, что при переходе бурового инструмента в указанную зону произошло увеличение крутящего момента. Также на самом уступе явно видно, что идентифицированный пропласток имеет высокую трещиноватость вблизи рассматриваемого участка скважины. Таким образом, низкая энергоёмкость бурения на указанном участке является откликом на трещиноватую породу.

Третий тип поведения данных, собранных при помощи системы измерения во время бурения, возникает, когда процесс бурения ведётся в расслоенной породе или в горном массиве с близко расположенными плоскостями напластования (скважина № 475). На графике наблюдается область повышенной скорости проходки для части скважины (рис. 11). Повышенное значение крутящего момента практически не наблюдается.

Как видно из графиков, представленных на рис. 11, неоднородности не вызывают резких колебаний в данных. Наблюдается характерный пик скорости проникновения как результат бурения через трещины/стыки, отмеченные красной зоной, но области между ними показывают почти постоянное поведение для пересечения плоскостей напластования. Статистическое среднее значение скорости проходки увеличено, в среднем, до 3 м/мин, что свидетельствует о низкой прочности породы.

После анализа поведения данных по процессу бурения и их верификации можно судить о реальном отклике бурового оборудования на изменения во время бурения и возможности сбора «чистых» данных с целью создания «материнской» базы для алгоритмов машинного обучения. В тоже время следует уделить особое внимание зонам со

структурными нарушениями в массиве. Подобного рода участки несут в себе информацию о состоянии массива, а именно о его целостности. Их определение крайне важно для более детального учёта таких зон при разработке моделей фрагментации или расчёта параметров буровзрывных работ. Однако определение таких зон возможно на основе показателей энергоёмкости бурения в совокупности с различными методами верификации, позволяющими глубже понять отклик бурения на изменения в массиве.

Для определения полной картины наличия таких зон в массиве в качестве дополнительного инструмента может быть проведён анализ и сопоставление между собой энергоёмкости бурения и данных по бурению в чистом виде. После этого появляется возможность определить, в каком случае скачки значений определяются переходами пород, а в каком — наличием или отсутствием трещиноватости пород.

В дальнейшем появляется возможность опираться на полученные зависимости и проводить базовое обучение алгоритма машинного обучения, что, в свою очередь, позволяет разрабатывать блочные модели исследуемого массива, идентифицируя переходы горных пород и зоны трещиноватости без необходимости ручного анализа.

Запись параметров бурения и их сравнение с рассчитанными значениями энергоёмкости бурения демонстрируют, что совместная интерпретация этих данных позволяет глубже понять геологические изменения и нарушения массива.

Конечно, следует понимать, что на каждом этапе сбор информации для создания обучающего набора информации должен сопровождаться постоянной проверкой полученных значений. В этом исследовании описаны два метода проверки, главный из которых — видеоэ-

доскопия, которая оценивает адекватность построенной модели энергоемкости. Видеоэндоскопия — полезный метод исследования зон структурных неоднородностей, и планируется продолжить ее использование на последующих этапах проекта. В текущем документе его результаты представлены только концептуально, так как основное внимание было уделено предварительно взорванным контурным скважинам и их данным по процессу бурения.

После создания большой базы данных с ее регулярным пополнением, оценки горного массива на основе информации по бурению и проверки полученных зон методом эндоскопии планируется использовать прогнозы алгоритма машинного обучения для построения блочной модели на основе не только значений энергоемкости, но и отдельных данных по бурению. Это позволит перейти к следующим этапам проекта, а именно к блокам «Физико-механические свойства горных пород и их структура» — «Параметры буровзрывных работ» — «Гранулометрический состав взорванной горной массы». Эти этапы также будут включать сбор чистых данных, например, чтобы сравнить прогнозы модели с фактическим распределением частиц по размерам.

Следует отметить, что представленный перечень данных (осевое давление, скорость вращения, скорость бурения, крутящий момент) не является исчерпывающим; большие наборы параметров бурения также можно использовать для обучения алгоритмов машинного обучения и получения высокоточных моделей.

Выводы

Проведенный анализ полученных в ходе исследований данных, а именно: параметров бурения, фотограмметрии откосов уступов и видеоэндоскопии сква-

жин показал, что система измерения во время бурения дает реальный отклик на изменения в массиве, такие как переходы пород, наличие трещиноватостей и нарушенностей и т.п. Исходя из этого, можно сделать вывод о целесообразности применения подобных систем в горной промышленности для повышения качества ведения буровзрывных работ.

Однако из-за неоднородности данных по процессу бурения и их сложности в связи с откликом бурового оборудования как на изменения типа пород, так и на наличие в породе неоднородностей, невозможно использовать для полноценной оценки состояния массива только один показатель, такой как энергоемкость бурения. Для более точной оценки природы появления скачков значений возможно сопоставление энергоемкости бурения и данных по процессу бурения.

При совместной оценке двух показателей становится возможным максимально точно определить, что представляет собой изучаемый массив горных пород. Однако проведение подобного анализа вручную становится невозможным из-за высокой трудоемкости таких работ. В связи с этим возникает потребность в подключении дополнительных инструментов, таких как нейронные сети или машинное обучение.

Как показывают современные исследования, методы машинного обучения, используемые для прогноза различных аспектов ведения взрывных работ, имеют превосходство над традиционными математическими и статистическими методами прогнозирования не только в точности, но и в скорости их работы. Объединение инструментов машинного обучения с получаемыми в режиме реального времени данными по процессу бурения позволит снизить затраты на детальное изучение горно-геологических характеристик массива, увеличить

эффективность производства комплекса буровзрывных работ и повысить качество их выполнения.

Вклад авторов

Ишейский В.А. — концептуализация материала статьи; отбор анализируемых ресурсов и источников; подготовка письменного оригинала; письменный обзор и редактирование.

Мартынушкин Е.А. — концептуализация материала статьи; отбор анализируемых ресурсов и источников; подготовка письменного оригинала

Васильев А.С. — подготовка письменного оригинала; письменный обзор и редактирование.

Смирнов С.А. — отбор анализируемых ресурсов и источников; подготовка письменного оригинала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протосеня А. Г., Вербило Э., Егоров Э. К. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива // Записки Горного института. — 2017. — Т. 223. — С. 51–57. DOI: 10.18454/PM1.2017.1.51.

2. Jang H., Topal E. A review of soft computing technology applications in several mining problems // Applied Soft Computing. 2014, vol. 22, pp. 638–651. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.05.019.

3. Ишейский В. А., Васильев А. С. Оценка корреляции параметров по процессу бурения взрывных скважин // Взрывное дело. — 2021. — № 130-87. — С. 113–126.

4. 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, pp. 925. DOI: 10.3390/min10100925.

5. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 1965, vol. 2, no. 1, pp. 57–73. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7.

6. Manzoor S., Liaghat S., Gustafson A., Johansson D., Schunnesson H. Establishing relationships between structural data from close-range terrestrial digital photogrammetry and measurement while drilling data // Engineering Geology. 2020, vol. 267, article 105480. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105480.

7. Van Eldert J., Schunnesson H., Saiang D., Funehag J. Improved filtering and normalizing of Measurement-While-Drilling (MWD) data in tunnel excavation // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, vol. 103, article 103467. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103467.

8. 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. DOI: 10.20868/UPM.thesis.53764.

9. Тангаев В. А., Двойников М. В., Егоров Э. К. Буримость и взрываемость горных пород. — М.: Недра, 1978. — 184 с.

10. Kosolapov A. I. Modern methods and tools for determining drillability and blastability of rocks // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 459, no. 2, article 022097. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022097.

11. Жариков С. Н. О способах изучения свойств грунтов для повышения эффективности буровзрывных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2016. — № 6(117). — С. 3–7.

12. Сухов Р. И., Реготунов А. С. Результаты исследований прочностных свойств локальных массивов в процессе бурения с применением программно-аппаратного комплекса // Проблемы недропользования. — 2016. — № 4 (11). — С. 121–129. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.121.

13. Сухов Р. И., Болкисев Вл. С. К вопросу изучения прочностных свойств горных пород при бурении взрывных скважин / Технология и безопасность взрывных работ: мате-

риалы научно-производственного семинара по взрывным работам. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. — С. 11 — 14.

14. Navarro J., Seidl T., Hartlieb P., Sanchidrián J. A., Segarra P., Couceiro P., Schimek P., Godoy C. Blastability and ore grade assessment from drill monitoring for open pit applications // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, no. 4, pp. 3209–3228. DOI: 10.1007/s00603-020-02354-2.

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. DOI: 10.1504/IJMME.2017.085830.

16. Akun M. E., Karpuz C. Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2005, vol. 42, no. 3, pp. 473–479.

17. Kahraman S., Balci C., Yazici S., Bilgin N. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000, vol. 37, no. 5, pp. 729–743. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00007-1.

18. LaBelle D. Lithological classification by drilling, Thesis Proposal. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2001.

19. 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, no. 6, pp. 859–864. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.001. **WAS**

REFERENCES

1. Protosenya A. G., Verbilo P. E. Research of compression strength of fissured rock mass. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 223, pp. 51–57. [In Russ]. DOI: 10.18454/PM1.2017.1.51.

2. Jang H., Topal E. A review of soft computing technology applications in several mining problems. *Applied Soft Computing*. 2014, vol. 22, pp. 638–651. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.05.019.

3. Isheyskiy V. A., Vasiliev A. S. Estimation of parameters correlation in the process of blasting borehole drilling. *Explosion technology*. 2021, no. 130-87, pp. 113–126. [In Russ].

4. 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, pp. 925. DOI: 10.3390/min10100925.

5. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 1965, vol. 2, no. 1, pp. 57–73. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7.

6. Manzoor S., Liaghat S., Gustafson A., Johansson D., Schunnesson H. Establishing relationships between structural data from close-range terrestrial digital photogrammetry and measurement while drilling data. *Engineering Geology*. 2020, vol. 267, article 105480. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105480.

7. Van Eldert J., Schunnesson H., Saiang D., Funehag J. Improved filtering and normalizing of Measurement-While-Drilling (MWD) data in tunnel excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, vol. 103, article 103467. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103467.

8. 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. DOI: 10.20868/UPM.thesis.53764.

9. Tangaev V. A., Dvoynikov M. V., Egorov E. K. *Burimost' i vzryvaemost' gornyx porod* [Drillability and blastability of rocks], Moscow, Nedra, 1978, 184 p.

10. Kosolapov A. I. Modern methods and tools for determining drillability and blastability of rocks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 459, no. 2, article 022097. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022097.

11. Zharikov S. N. About how to study the properties of soil to improve the efficiency of drilling and blasting. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 6(117), pp. 3–7. [In Russ].

12. Sukhov R. I., Regotunov A. S. The results of studies of strength properties of local arrays in the drilling process using software and hardware complex. *Problems of Subsoil Use*. 2016, no. 4 (11), pp. 121 – 129. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.121.

13. Sukhov R. I., Bolkisev V. S. On the issue of studying the strength properties of rocks during drilling of blast holes. *Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh работ: materialy nauchno-proizvodstvennogo seminar po vzryvnym работam* [Technology and safety of blasting: materials of the research and production seminar on blasting], Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2017, pp. 11 – 14.

14. Navarro J., Seidl T., Hartlieb P., Sanchidrián J. A., Segarra P., Couceiro P., Schimek P., Godoy C. Blastability and ore grade assessment from drill monitoring for open pit applications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, no. 4, pp. 3209–3228. DOI: 10.1007/s00603-020-02354-2.

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. DOI: 10.1504/IJMME.2017.085830.

16. Akun M. E., Karpuz C. Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2005, vol. 42, no. 3, pp. 473–479.

17. Kahraman S., Balci C., Yazici S., Bilgin N. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000, vol. 37, no. 5, pp. 729 – 743. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00007-1.

18. LaBelle D. *Lithological classification by drilling*, Thesis Proposal. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2001.

19. 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, no. 6, pp. 859 – 864. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Мартынушкин Евгений Александрович – технический директор,
ООО «ВЗРЫВ ГРУПП», e-mail: e.mart1985@mail.ru,

Васильев Антон Сергеевич¹ – аспирант, e-mail: anton270198@yandex.ru,

Смирнов Сергей Анатольевич – технический директор,
ООО «Ресурс», e-mail: smirnov07777@yandex.ru,

¹ Санкт-Петербургский Горный университет.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Isheyskiy¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

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

ORCID ID: 0000-0003-1007-6562,

E.A. Martynyskin, Technical Director, ООО «VZRYV GRUPP»,

652707, Kiselevsk, Russia, e-mail: e.mart1985@mail.ru,

A.S. Vasilyev¹, Graduate Student, e-mail: anton270198@yandex.ru,

S.A. Smirnov, Technical Director, ООО «Resurs»,

654007, Novokuznetsk, Russia, e-mail: smirnov07777@yandex.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: V.A. Isheyskiy, e-mail: Isheyskiy_VA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 11.01.2022; получена после рецензии 17.01.2022; принята к печати 10.03.2022.

Received by the editors 11.01.2022; received after the review 17.01.2022; accepted for printing 10.03.2022.