

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ, АНАЛИЗЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ПО ПРОЦЕССУ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН

В.А. Ишейский<sup>1</sup>, А.С. Васильев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: lsheyskiy\_VA@pers.spmi.ru

**Аннотация:** Представлен подробный анализ технологии измерения во время бурения (Measurement While Drilling — MWD) применительно к горному и взрывному делу, проведен глобальный анализ отечественных и зарубежных проектов и сопутствующих документов, в результате чего намечены основные направления развития исследований по применению указанной технологии при производстве буровзрывных работ на горных предприятиях. Рассмотрены фундаментальные труды ученых, занимавшихся исследованиями в этой области, описано текущее состояние вопроса исследований и представлен путь усовершенствования технологии для бурильных машин и агрегатов. Детально разобраны и описаны подходы и проблемы применения систем мониторинга за процессом бурения, которые были выявлены в результате анализа и сбора данных по процессам бурения. В ходе анализа были выявлены и выделены основные проблемные места, которые требуют особого внимания при внедрении различных систем измерения параметров бурения, отмечены и разобраны трудности, связанные с повсеместным внедрением технологии на горных предприятиях. На основе проведенных работ и анализа глобальных реализованных проектов в отечественной и зарубежной практике с применением систем измерения во время бурения представлено резюме о существующих подходах в области апробации и верификации данных, применяемых до настоящего времени для преодоления трудностей и неопределенностей, связанных с глобальным применением технологии в горной и строительной отраслях, выделены ключевые вопросы, требующие дополнительного изучения и подтверждения ввиду противоречивости получаемых данных. Намечены главные направления исследований, которые заслуживают внимания и интереса научного сообщества и ученых, занимающихся развитием данной темы.

**Ключевые слова:** мониторинг процесса бурения, параметры бурения, корреляция данных бурения, данные бурения, взрывные скважины.

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

**Для цитирования:** Ишейский В. А., Васильев А. С. Ключевые особенности и проблемы при обработке, анализе и интерпретации данных по процессу бурения взрывных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 16–33. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_16.

---

## Processing, analysis and interpretation of blasthole drilling data – Peculiarities and problems

V.A. Isheyskiy<sup>1</sup>, A.S. Vasilyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Isheyskiy\_VA@pers.spmi.ru

---

**Abstract:** The article discusses application of the Measurement While Drilling technology (MWD) in mining and blasting. The global analysis of Russian and foreign projects and paperwork allowed identifying the lines of the further research connected with application of this technology in drilling-and-blasting in mines. The relevant basic research works are reviewed, the current situation is described, and the way of improving the technology for drilling machines and assemblies is shown. The approaches and problems connected with drilling monitoring, revealed during the drilling data accumulation and analysis, are comprehensively described. The analysis exposed the chief bugbears to be specially treated in introduction of the MWD systems, and pointed at the common difficulties connected with the blanket implementation of the technology at a commercial scale in the mining industry. Based on the accomplished review and analysis of the global Russian and foreign MWD projects, a summary on the existing approaches to data evaluation and verification to overcome difficulties and uncertainties connected with global application of the MWD technology in the mining and construction industries is presented, and the key points to be additionally investigated and verified because of the data inconsistency are highlighted. The major research trends worthy of attention and interest of scientists engaged in development of this research issue are defined.

**Key words:** drilling process monitoring, drilling parameters, drilling data correlation, drilling data, blastholes.

**Acknowledgements:** The authors express their gratitude to the Council for Grants of the President of the Russian Federation for the governmental support of young scientists and Russia's top academic schools for the financial backing of the R&D project, Grant No. MK-3770.2021.4.

**For citation:** Isheyskiy V. A., Vasilyev A. S. Processing, analysis and interpretation of blasthole drilling data—Peculiarities and problems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):16-33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_16.

---

### Введение

Измерение во время бурения (далее MWD) — это современная технология, позволяющая измерять и получать различные типы данных о массиве горных пород в процессе бурения скважин и шпуров в режиме реального времени. Такая информация имеет ценное значение как для анализа данных, так и для использования ее в инженерных расчетах и при принятии своевременных проектных решений по дальнейшим про-

цессам разупрочнения массива горных пород и оценке его устойчивости [1]. На сегодняшний день известно большое количество проектов и работ, в которых был успешно реализован сбор данных во время бурения.

Например, при проходке горных выработок: при строительстве водоочистных сооружений в «Беккелагет», Осло (Норвегия), при строительстве автодорожного тоннеля в «Соркьосен», (Норвегия), высокоскоростного железнодоро-

рожного тоннеля «Эль-Эспино», (Испания); на открытых разработках: при отработке известнякового карьера «Эль Альджиб» (Испания), медного рудника «Хайлэнд Волли» (Канада), на угольном разрезе «Тугнуйский» (Россия) и т.д.; при подземной добыче руды: на руднике «Малмбергет» (Швеция).

В основе технологии лежит мониторинговая система, состоящая из бурового агрегата, различных датчиков, установленных на нем, блока обработки поступающих сигналов, канала связи, устройства для хранения и обработки поступающих данных [2]. В процессе развития технических устройств и аналитической аппаратуры встречаются некоторые вариации классической технологии («Кобус», «VG-Drill», «Exp. manager», «I-SURE»). Они имеют различия в компоновке и дополнительном оснащении, которое позволяет повысить точность и качество измерений, устранить ошибки и параллельно осуществлять верификацию данных, полученных в результате измерений.

В процессе мониторинга бурения, в зависимости от типа применяемой буровой установки, измеряются такие параметры, как: осевое давление, давление воздуха, питающее давление, давление удара, скорость вращения долота, скорость бурения (проходки), крутящий момент, давление жидкости, расход жидкости, глубина, время бурения и т.д. [2]. Полученные значения параметров в дальнейшем представляются зависимостями от времени или глубины бурения. Полученные данные в результате бурения становятся опорными для последующего описания характеристик массива.

Главным преимуществом применения данной технологии по сравнению с известными способами оценки информации о геологической структуре и физико-механических свойствах горных

пород, такими как керновое бурение или геофизический каротаж, является оперативность и относительная дешевизна получения данных [3]. Это позволяет наиболее мобильно и эффективно принимать проектные решения, отталкиваясь от данных, поступающих в режиме реального времени, а также быстро реагировать на изменения в массиве горных пород.

Детальную информацию о прочностных и структурных особенностях горных пород, подлежащих взрывному разрушению, можно получить в процессе бурения взрывных скважин благодаря использованию системы MWD [4]. Уточненные при бурении данные о свойствах горных пород, структурных нарушениях, трещинах и пустотах позволяют скорректировать расчеты при проектировании параметров буровзрывных работ для более рационального управления энергией взрыва.

Однако на сегодняшний день существуют нерешенные вопросы, затрудняющие массовое внедрение данной технологии повсеместно. В этой статье будут затронуты некоторые аспекты применения технологии MWD, изложены примеры реализации технологии, обозначены проблемные места и дальнейшие перспективы развития технологии MWD применительно ко взрывным работам.

### **Анализ методов обработки и интерпретации данных по процессу бурения**

На сегодняшний день одним из основных показателей эффективности процесса бурения является удельная энергия бурения. Концепция удельной энергии была введена Р. Тилом [5] как работа, которую необходимо затратить на единицу пробуренного объема грунта. При вращательном бурении работа выполняется как за счет осевой нагрузки

на долото, так и за счет крутящего момента. Он ввел уравнение для удельной энергии, которое в дальнейшем использовалось многими учеными в своих исследованиях [6–10].

В отечественной практике на основе использования таких параметров, как мощность, потребляемая двигателем вращателя и скорость бурения, И.А. Тангаевым была предложена одна из классификаций горных пород по буримости [6]. В многочисленных экспериментах, выполненных в производственных условиях, измерялась мощность, потребляемая двигателем вращателя бурового става станка без учета мощности на вращение без нагрузки. В результате, взяв в качестве базовой оценки горных пород шкалу «Единой классификации горных пород по буримости» [7], он дополнил ее значениями удельной энергоемкости для различных типов пород.

А.И. Косолапов в своей работе вывел корреляцию между удельной энергией бурения, коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова и удельной энергией взрыва для станков вращательного бурения, гидравлических и электрических буровых станков [8], таким образом перейдя от коэффициента крепости к параметрам удельной энергии бурения и взрывания. Преимущество такого подхода заключается в возможности измерения удельной энергии бурения непосредственно в процессе бурения взрывных скважин и определения на этой основе коэффициента твердости и удельной энергии взрыва.

С.Н. Жариковым [9] была разработана схема построения цифровой модели крепости горных пород по шкале проф. М.М. Протодяконова на основе измерения параметров процесса бурения. Крепость устанавливалась в соответствии с показателем буримости пород, который рассчитывался, исходя из замеренных скорости бурения, осевого

давления и частоты вращения. На основе полученных результатов разработана методика определения величины удельного расхода взрывчатого вещества (ВВ) по данным бурения технологических скважин, которая позволяет строить модели изменения крепости пород по высоте уступа, определять пропорциональность между энергетическими характеристиками шарошечного бурения и взрывного разрушения массива горных пород, а также уточнять массу заряда ВВ по каждой взрывной скважине.

А.С. Реготунов и Р.И. Сухов [10] представили результаты исследования прочностных свойств горных пород в процессе шарошечного бурения с применением программно-аппаратного комплекса. В работе описана схема уточнения прочностных параметров локального горного массива, подлежащего взрыванию. Основным параметром, используемым для уточнения прочностных и технологических свойств пород, являлась энергоемкость бурения (удельная энергия). В расчетной схеме уже учитываются поправки, связанные с износом бурового инструмента и очисткой скважины. В дальнейшем рассчитывается показатель трудоемкости бурения по В.В. Ржевскому и строится модель распределения пород по глубине массива, благодаря которой можно регулировать степень взрывного нагружения по каждой скважине с учетом прочности пород на данном участке.

Браун и Барр провели ранние исследования зависимости параметров бурения от различных геомеханических особенностей. Авторы делают вывод, что именно непрерывная запись рабочих параметров, сделанная во время бурения, может предоставить информацию о механических свойствах пород [11]. На основе анализа всех параметров ударно-вращательного бурения они разделили их на две группы: зависимых и неза-

висимых параметров (рис. 1). На независимые параметры влияют исключительно мощность буровой установки, режим бурения и система контроля, но не свойства массива пород. На зависимые параметры влияет реакция системы бурения на изменения в состоянии горных пород.

Браун в своей статье фактически подкрепил применимость технологии MWD в горном деле, сделав вывод о том, что система способна обеспечить оценку физико-механических свойств горной породы на основе удельной энергии бурения, прочности горных пород на сжатие и геологических свойств. Данный метод также позволял выявлять трещины (как открытые, так и закрытые) и пустоты в массиве пород.

Лейтон использовал данный подход для нахождения оптимальных параметров БВР, позволяющих уменьшить повреждения законтурного массива при проведении контурного взрывания на карьере по добыче медной руды. Основываясь на мониторинге данных, полученных от станков шарошечного бурения при бурении взрывных скважин большого диаметра, Лейтон впервые продемонстрировал возможность оптимизации взрывных работ на основе анализа параметров бурения для расчета «индекса качества горных пород» [12]. В исследовании автор методом линейной регрессии вывел зависимость между удельным расходом применяемого ВВ и показателем «индекса качества горных пород» для используемого бурового оборудования.

Лейтон установил, что основные проблемы, связанные с этим подходом, заключаются в том, что значения «индекса качества горных пород» не отражают исчерпывающую информацию о состоянии горного массива, так как при подсчете индекса используют значения лишь двух параметров бурения — скорости бурения и осевого усилия, также этот подход был протестирован только для одного типа бурения [12].

Лопез объединил скорость бурения, осевое усилие, скорость вращения долота и диаметр бурения для устранения ограничений «индекса качества горных пород» и ввел «индекс характеристики породы», зависящий от этих параметров. Он отметил: поскольку скорость бурения зависит от геомеханических свойств горной массы, «индекс характеристики породы» имеет тесную связь с прочностью породы. В результате Лопез, основываясь на данных, которые он собрал и проанализировал на многочисленных рудниках, выявил более точную зависимость между удельным расходом ВВ и «индексом характеристики породы» [13].

Лилли разработал «индекс взрываемости» на основе описания горного массива. Он обнаружил, что существует четыре основных параметра, которые существенно влияют на эффективность взрывных работ. Это блочная структура массива горных пород, расположение и ориентация плоскостей трещин, удельный вес пород и прочность на одноосное сжатие. В результате было выведено уравнение для расчета индекса

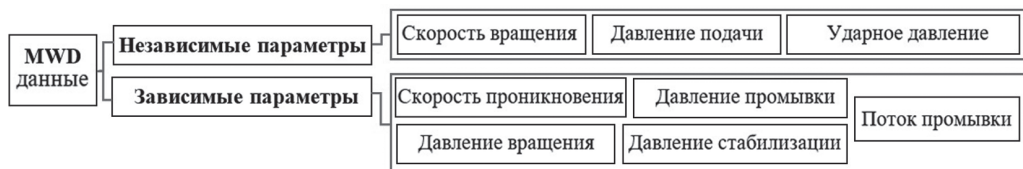


Рис. 1. Градация зависимых и независимых параметров данных MWD [11]

Fig. 1. Ranking of dependent and independent parameters of the MWD data [11]

са взрываемости на основе указанных параметров [14]. Инь и Лю также использовали информацию, полученную из данных мониторинга бурения, для оценки взрываемости горных пород. Они ввели усовершенствованный «индекс качества горных пород» как меру взрываемости и определили его как величину силы, требуемой на единицу скорости бурения. Используя анализ размерностей и определив две группы безразмерных параметров, состоящих из скорости бурения, осевого усилия, крутящего момента и скорости вращения, они предложили новое уравнение для «индекса качества горных пород» с двумя константами, которые рассчитываются на основе набора ограниченных допущений, а не строгого математического подхода [15].

Скобл и Пек отметили, что мониторинг и интерпретация данных о производительности бурения позволяют определить помимо прочности также и структуру горного массива. Они обнаружили корреляцию параметров работы бурового оборудования с изменениями прочности, литологии и частоты трещин неповрежденных пород. Они, по сути, произвели верификацию получаемых данных MWD, определив местоположения трещин на основе регистрации показателей скорости проникновения буровой коронки при бурении скважин малого диаметра ударно-вращательным бурением в известняковом карьере в Монреале и сопоставили эти данные со съемкой внутрискважинной камерой и анализом зерна. В этом исследовании было показано, что 90% трещин, обнаруженных скважинной камерой, согласовывались с трещинами, расположенными по определенным пикам на графиках скорости бурения от глубины скважины [16]. Более того, ими была исследована корреляция между параметрами бурения и геофизическим каротажем при

шарошечном бурении взрывных скважин большого диаметра, однако, в связи со сложностью интерпретации данных со станков электрического типа, корреляция между данными оказалась невысокой. Также Скобл и Пек, как Браун и Барр, пришли к выводу, что измеряемые при вращательном бурении параметры можно разделить на две группы: независимые параметры, которые контролируются оператором буровой установки и буровой системой, такие как скорость вращения и вес долота, и зависимые параметры, такие как скорость бурения, крутящий момент и давление воздуха, связанные с изменениями свойств пород а также подверженные влиянию изменения других параметров бурения [16].

В дальнейшем идеи этих ученых были развиты в работе [1] Хорзуги из университета Британской Колумбии (Канада), которым было проведено исследование применения MWD при шарошечном бурении взрывных скважин большого диаметра на карьере медного рудника «Хайлэнд Волли» (Канада) для количественного определения трещиноватости массива. За основу работы автор взял существующий альфа-алгоритм определения «компенсированного индекса взрываемости», основанный на расчете «фактора уменьшения трещиноватости». Этот алгоритм компенсировал стандартный «индекс взрываемости» [14], полученный из расчета удельной энергии бурения на основе учета наличия трещин.

Автором была произведена интерпретация и обработка непрерывно записанных электрических сигналов с системы MWD бурового станка в физические единицы измерения для дальнейшей работы с данными. Помимо измерений, осуществляемых системой MWD, был произведен геофизический каротаж пробуренных скважин для сопоставления с результатами работы алгоритма и подтверждения или опро-



вержения его эффективности. Взятый автором за основу альфа-алгоритм, как показало исследование, не мог надежно определять трещины в массиве. Для улучшения существующего алгоритма автор применил усовершенствованный «фактор уменьшения трещиноватости» [17], который теперь рассчитывался методом «скользящей» средней с учетом непосредственной взаимосвязи параметров MWD с наличием раскрытых и нераскрытых трещин, выявленных при каротаже. Улучшенный алгоритм показал хорошие результаты и корреляцию с данными каротажа. Однако исследование также подтвердило, что алгоритм не может определять трещины с углом падения более 60° [1] (рис. 2).

Шуннессон провел фундаментальные исследования по мониторингу параметров для ударно-вращательного бурения и пришел к выводу, что даже один параметр (например, скорость бурения) может использоваться для определения качества пробуриваемых пород, когда присутствует существенная разница в свойствах пород между геологическими зонами (например, между монолитной и трещиноватой породами при бурении на открытых горных работах).

Однако, когда параметры пород слабо отличаются между типами горных пород, использование только одного параметра бурения становится неэффективным. Необходимо учитывать сразу несколько параметров бурения и их взаимодействие. Шуннессон выполнил иссле-

дование [18] по предварительной оценке «показателя нарушенности пород» в зависимости от измеренных в процессе мониторинга бурения показателей MWD. Он произвел анализ реакций изменения (отклонения) таких параметров бурения, как давление вращения (крутящий момент), скорость бурения и скорость вращения на структурные нарушения в горных породах. Результаты проведенного исследования показали, что изменения (отклонения) скорости бурения и давления вращения (крутящего момента) в большинстве случаев прямо пропорциональны интенсивности трещиноватости и нарушенности массива. Однако автор отметил, что при сильной трещиноватости, скорость бурения и скорость вращения могут уменьшаться с одновременным увеличением крутящего момента. Такая ситуация может быть объяснена заклиниванием или зажатием буровой коронки. Для предварительной оценки «показателя нарушенности пород» автор использовал анализ главных компонент и метод наименьших квадратов. Корреляция между посчитанными и измеренными на поверхности забоя «показателями нарушенности пород» оказалась хорошей, несмотря на то, что при измерении показателя непосредственно на забое имеет место влияние предыдущего взрыва на поверхность массива, а при измерении параметров в процессе бурения оценивается определенный объем нетронутой породы вокруг шпуров.

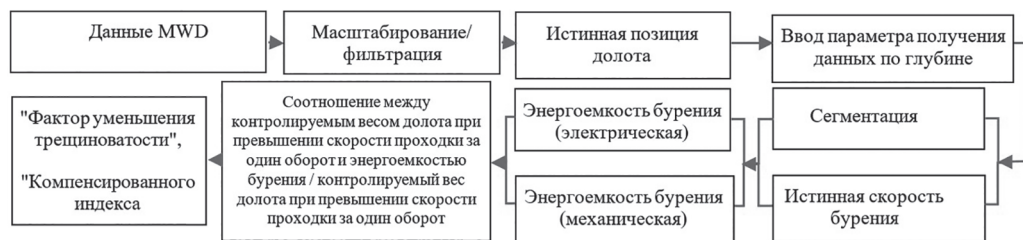


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления «компенсированного индекса взрываемости» [1]

Fig. 2. Compensated Blastability Index calculation flow chart [1]

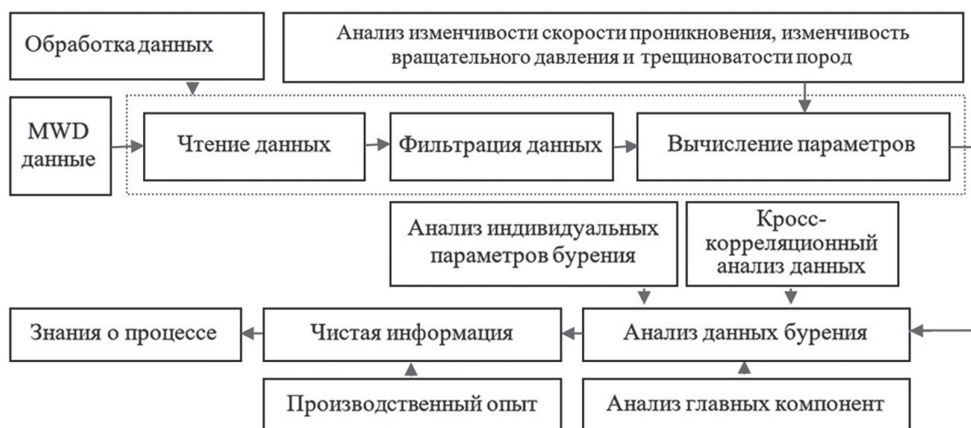


Рис. 3. Методология обработки и интерпретации данных [20]

Fig. 3. Data processing and interpretation methodology [20]

В другой своей работе [19] автор предложил методологию анализа данных, основанную на пошаговой процедуре нормализации, заключающейся в отделении взаимного влияния параметров бурения друг на друга. Первый шаг включал в себя исключение влияния глубины шпура на такие параметры, как осевое усилие, скорость бурения и давление вращения. На втором шаге было исключено влияние осевого усилия на скорость бурения и давления вращения. Финальным шагом была нормализация давления вращения и скорости бурения, а также исключение их взаимного влияния. Таким образом, в результате применения метода пошаговой нормализации, остались только данные, напрямую зависящие от изменения свойств горного массива, которые в дальнейшем могут быть использованы для более точного описания показателей горных пород. Методика успешно прошла испытания на нескольких горнопроходческих проектах, где автор использовал анализ главных компонент, основанный на таких параметрах, как: нормализованная скорость бурения и давление вращения и их изменения (отклонения).

В дальнейшем идеи шведского ученого развил Р. Гош в своей диссертаци-

онной работе [20]. Исследование автора было посвящено оценке качественного состава горного массива и его влияния на зарядание вееров скважин для взрывной отбойки железной руды в условиях подземного рудника Малмбергет (Швеция). В работе были собраны данные с системы мониторинга бурения взрывных вееров буровым станком с погружным гидроударником (рис. 3) с последующей верификацией по данным видеосъемки внутри скважин.

Автором был введен комбинированный параметр трещиноватости, рассчитанный на основе изменения (отклонения) параметров скорости бурения и вращения давления, при этом было проведено масштабирование отклонений с использованием среднеквадратической ошибки зарегистрированных параметров. Изменение значений данного параметра говорило о вхождении скважины в монолитную зону, зону трещиноватости, зону обвала скважины, либо в зону пустот [20].

Р. Гош и др. использовали расширенный анализ главных компонент, который включал в себя большее число измеренных и рассчитанных переменных, чем у его предшественника, а также, помимо фильтрации, провел нормализа-



цию измеренных параметров, исключив влияние глубины бурения на их значения. На основе отдельного анализа для всех геотехнических зон была создана геомеханическая модель для заряжания взрывных скважин, включающая в себя пять рангов пород. Чтобы получить эти ранги, он представил в виде функций распределения вероятностей значения первых главных компонент для четырех изученных геотехнических зон, получив четыре кривые. Основываясь на форме этих кривых и соотношении между ними, он определил пять различных рангов горных пород. Была произведена валидация представленной модели с полевыми данным, полученными в процессе заряжания взрывного веера, которая показала высокую совместимость результатов.

Группой испанских ученых из Мадридского политехнического университета (Испания) было проведено комплексное исследование [21, 22], посвященное использованию технологии MWD для характеристики горного массива и оценке ущерба, нанесенного взрывом. Исследование включало в себя оценку применения системы MWD при горнопроходческих работах, при взрывной отбойке в подземных рудниках и при использовании системы в условиях карьера. Авторами были собраны и проанализированы большие объемы данных, полученных с различных горных производств и объектов строительства в таких странах, как Испания, Норвегия и Швеция.

На основе анализа данных с трех объектов строительства туннелей была произведена оценка взаимосвязи между параметрами MWD для выявления параметров, которые имеют значительное влияние на процесс бурения. Это позволило ограничить число переменных, используемых при характеристике массива горных пород. Как показали преды-

дущие исследования, существуют некоторые противоречия в описании характеристик буровой системы относительно того, каковы взаимоотношения между параметрами MWD и какие из них являются приоритетными. Для решения данного вопроса авторами был применен статистический анализ взаимной корреляции между всеми измеряемыми параметрами. В результате анализа была получена кросс-корреляционная матрица, благодаря которой была выявлена значительная взаимосвязь между 5 параметрами из 8. Для всех рабочих условий, зависящих от режима работы бурового станка, свойств горных пород на объекте и интервалов измерений именно параметр давления подачи приводит к изменению остальных параметров. Параметры скорости вращения, давления жидкости и расхода жидкости незначительно коррелируют с остальными параметрами, а значит, зависят от изменений именно в горных породах и могут быть использованы для оценки их свойств [21].

На следующем этапе была произведена оценка отклонений положений шпуров при бурении на основе данных, измеренных системой MWD, и фактического замера траектории шпуров с помощью уменьшенного под диаметр шпуров зонда. Сравнение результатов для некоторых случаев показало достаточно сильное отклонение фактического положения шпура от измеренного системой. Это связано с тем, что измерительные сенсоры (инклинометры-акселерометры) установлены на выносном перфораторе, и измерение происходит вне пробуриваемого шпура. Пики и падения, обнаруженные в изменении давления вращения и в сигналах давления подачи и ударного давления, соответственно, в значительной степени связаны с изменениями траектории взрывной скважины, на которую, в свою оче-

редь, влияют зоны нарушений в породе. Кроме того, изменения величины давления вращения, удара и питающего давления изменяют давление буровой штанги на породу, что может повысить вероятность отклонений во время бурения.

Авторами [22] была создана модель прогноза среднего расстояния разрушения породы от контурных шпуров при проходке. Спрогнозированные моделью значения расстояний были сравнены с посчитанными по данным лазерного сканирования и MWD регистрации положения контурных шпуров. Перед созданием модели все записанные параметры подвергались фильтрации (устранение экстремальных значений и периода забуривания), нормализации (устранение зависимостей параметров от длины шпура и давления подачи) и устранению флуктуаций (нормализация стандартным отклонением). Были проанализированы различные уравнения модели, но конечная нелинейная степенная модель представляла собой функцию нормализованных скорости бурения, скорости вращения, давления вращения, расхода жидкости и расстояния, учитывающего положение шпура. Модель была успешно протестирована и показала хорошие результаты, несмотря на то, что не были учтены отклонения шпуров при бурении, перед сканированием была выполнена оборка и крепление выработки, а также не была произведена калибровка лазерных сенсоров [22].

На основе исследований, проведенных Р. Гош [20], авторами [23] была разработана полномасштабная блочная 3D модель состояния горного массива и модель прогноза риска обрушения скважин на подземном руднике «Малмбергет» при отбойке руды взрывными веерами. За основу была взята разработанная геомеханическая модель заряжаемости скважин [63], использующая анализ главных компонент. Поскольку

существующая модель была достаточно сложна для интерпретации и включала большое количество разных классов пород на маленьких интервалах, первая компонента, используемая в модели, была разделена на зоны в соответствии с резким изменением ее среднего значения. Таким образом упрощенная модель облегчила количественную оценку и автоматическое распознавание изменений в состоянии горных пород. Для построения полномасштабной блочной 3D модели состояния рудных тел было использовано большое количество вееров, пробуренных из разных выработок, учитывая координаты пробуренных скважин и координаты бурового станка относительно системы координат рудника. Также была создана полномасштабная модель прогноза риска обрушения скважин в веере на основе блочной модели состояния пород, которая позволяет отнести скважину к одной из трех категорий риска. Произведенная в соответствии с мониторингом процесса зарядания для 11 вееров верификация модели подтвердила ее эффективность [23].

В рамках проекта Европейского Союза S.L.I.M. была разработана локальная система MWD как недорогая альтернатива существующим современным системам. Она предназначена для установки на буровых станках на небольших карьерах с целью мониторинга и записи информации о процессе бурения. Одним из таких карьеров, где была опробована эта система, стал «Эль Альджиб» (Испания), на котором были произведены анализ и обработка данных мониторинга MWD на основе следующих параметров: изменение (отклонение) давления подачи, ударного давления и давления вращения. На основе полученных данных был установлен индекс трещиноватости горных пород [24]. Но в отличие от введенного ранее параметра трещиноватости, было выполне-

но масштабирование величины отклонения каждого параметра бурения от его среднего значения. Это масштабирование осуществлялось с целью минимизации различий между величинами ударного давления, давления подачи и давления вращения. В результате полученный индекс [20] показал пики и отклонения при прохождении бурового долота через различные нарушения в горных породах. Качественная валидация данного индекса была произведена с использованием фотографических записей стенок скважин, полученных с помощью оптического телевидения. В результате геотехнического анализа этих записей было обнаружено пять различных типов нарушений горной породы. Было установлено, что чем больше и сложнее зона нарушения, тем более широко изменяется индекс трещиноватости, в связи с этим присвоить определенный индекс конкретному нарушению представляется трудным. Несмотря на это, результаты показали хорошую визуальную корреляцию с обнаруженными в породе нарушениями [20].

Д. Эльдертет и др. [25] представили результаты исследования по улучшению алгоритма фильтрации и нормализации

данных MWD. Проведя анализ параметров для 951 пробуренной закладочной скважины и 12 702 шпуров в схожих горно-геологических условиях при проходке Стокгольмского объездного тоннеля на участке между г. Скерхольмен и г. Сета (Швеция), они усовершенствовали существующий порядок обработки данных MWD.

Новый алгоритм включал следующий порядок действий (рис. 4): исключение данных забуривания скважин и шпуров, исключение данных присоединения новых буровых штанг для скважин, разделение данных в зависимости от буровой установки, перфоратора и буровых штанг, нормализация данных от глубины бурения (для каждой буровой штанги в случае проходки скважин), нормализация данных от давления подачи, нормализация давления вращения от скорости бурения, затем исключение аномальных значений и масштабирование на основе средних значений. Новый метод показал улучшенные результаты нормализации для длинных скважин, в которых происходит присоединение новых буровых штанг. Для шпуров, где используется одна буровая штанга, результаты практически не изменились.

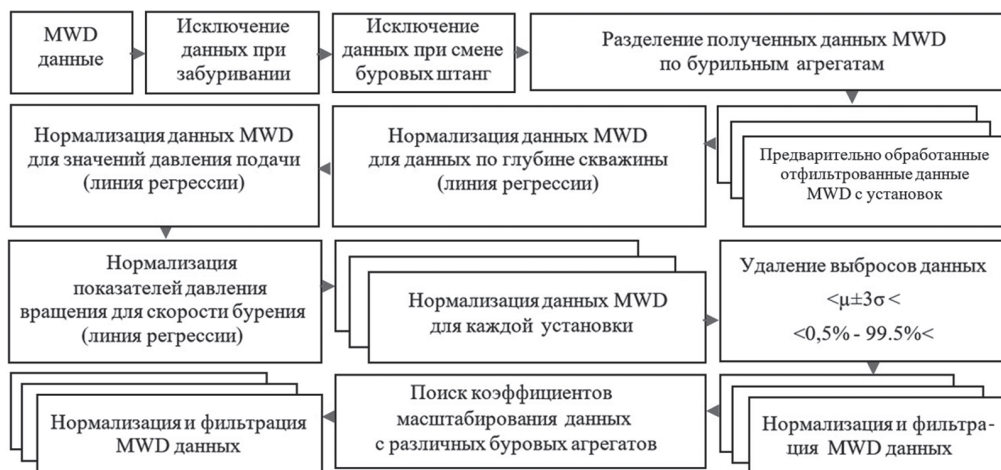


Рис. 4. Процесс фильтрации и нормализации поправок для данных MWD [25]

Fig. 4. Filtering and normalization of corrections for the MWD data [25]

С. Манзор и др. в своей работе установили взаимосвязь между структурой уступа на открытых горных работах, полученной методом цифровой фотограмметрии и данными MWD. Проведя структурный анализ полученной модели и выявив различные нарушения горных пород в виде трещин, пустот, прослоек и т.д., они произвели сопоставление отклонений и пиков предварительно обработанных параметров бурения скважин с этими нарушениями в соответствии с расположением скважин на модели. Взаимосвязь между структурой пород уступа и данными MWD производилась для двух типов выемочных блоков: для блока с крепкими породами, взрываемого с предварительным щелеобразованием, и для блока со слабыми породами и слоистой структурой. Результаты показали, что в обоих случаях значения давления подачи и ударного давления практически не реагируют на изменение структуры уступа. С другой стороны, для уступа с крепкими породами скорость бурения и давление вращения возрастают, когда скважина пересекает крупные трещины или пустоты, при этом пики на графике MWD четко выражены в случае одиночных открытых трещин, и разбросаны в случае пустот. Для слоистого уступа со слабыми породами, данные MWD в целом показали увеличение средней скорости бурения за счет меньшей прочности пород, однако слоистость и наличие прослоек не вызывали отклонения параметров скорости бурения и давления вращения, и пики на графиках MWD возникали только при пересечении скважиной открытых трещин.

На основе проведенного анализа в настоящее время самыми серьезными проблемами и препятствиями в технологии MWD являются точность полученных данных и надежность установления зависимостей между свойствами горных пород и данными бурения.

Существующие исследования показывают растущий интерес научного сообщества к использованию данных MWD для оптимизации процессов горнодобывающей промышленности на основе детального изучения свойств горных пород в процессе бурения. Однако, как видно из обзора, несмотря на достигнутые успехи в области применения технологии MWD, существует большое количество препятствий и неопределенностей, в той или иной степени затрудняющих использование полученных данных.

### **Обсуждение результатов**

Существующие на сегодняшний день исследования показывают растущий интерес научного сообщества к использованию данных MWD для оптимизации процессов горнодобывающей промышленности на основе детального изучения свойств горных пород в процессе бурения. Основные проблемы, с которыми сталкиваются исследователи при обработке, анализе и использовании данных MWD:

1. Корреляция записываемых параметров бурения между собой не является постоянной и изменяется в зависимости от конкретных геологических условий и конкретного бурового оборудования;

2. Сложность выявления параметров бурения, не зависящих от других показателей бурения и системы контроля бурения, учета влияния горно-геологических факторов на изменение этих параметров, исключения ошибок и факторов, не связанных с непосредственным процессом бурения. Среди имеющихся исследований возникают противоречия в том, какие параметры использовать для описания свойств горных пород в различных условиях;

3. Верификация измеренных системой MWD параметров во многих случаях подтверждает достоверность измеренных данных. Однако, не смотря на

многообразии и высокую точность методов верификации данных, включающих оптические, механические и геофизические методы, существуют проблемы в сопоставлении информации, полученной этими методами и информации, собранной системой MWD. Например, при выявлении структурных особенностей и различных нарушений в массиве параметры, зарегистрированные системой, могут исказиться за счет заклинивания бурового инструмента в зоне сильной трещиноватости, холостого вращения в зоне пустот, отклонения бурового става в процессе бурения. За счет этого искажения одного или нескольких параметров, другие зависимые от них параметры также исказятся за счет автоматического срабатывания системы контроля бурения, таким образом, приведя к регистрации ошибочных параметров, не связанных с изменениями в горном массиве. В этой связи при сопоставлении и верификации данных необходимо учитывать работу системы контроля и взаимосвязь между параметрами бурения;

4. Все практические применения использования системы MWD относятся к характеристике качественного и количественного состава горного массива до проведения взрывных работ. То есть, благодаря данным, полученным системой, предоставляется возможным на основе учета прочностных свойств и структурных особенностей горных пород внести поправки в проектируемые параметры буровзрывных работ для увеличения их эффективности. Однако также существует необходимость прямой оценки зависимости результатов проведения буровзрывных работ от измеренных параметров MWD с целью прогнозирования результата, поскольку наряду с геометрическими характеристиками объекта, прочностными свойствами горных пород и их структурными особен-

ностями на него влияют и сами параметры буровзрывных работ (тип применяемого ВВ, удельный расход, конструкция заряда и т.д.);

5. Методы машинного обучения, использующие данные MWD, ограничивают число входных параметров для упрощения конечного алгоритма и уменьшения времени вычисления и обучения. Выбор входных параметров из всего множества данных является сложной задачей, так как для каждого бурового станка и режима бурения он может оказаться разным.

Поскольку существующие методы обработки и анализа данных MWD, в основном, используют инструменты статистического анализа, исключающего автоматическую обработку данных при изменении горно-геологических и технических условий, то при изменении этих условий, например, смене режима работы бурового станка даже в пределах одного месторождения, возникает необходимость проводить обработку данных заново, т.е. определять зависимые и независимые параметры системы, выявлять наиболее значимые параметры, зависящие от свойств пород и т.д. В этой связи актуальной научно-практической задачей является создание обучаемого алгоритма, использующего методы машинного обучения, который на основе имеющихся входных данных, относящихся к конкретным условиям, мог бы коррелировать, обрабатывать и выбирать параметры, получаемые с бурового станка, и использовать их для дальнейшего расчета различных характеристик горных пород, прогнозирования оптимальных параметров буровзрывных работ и результатов взрыва. При этом создание базы обучающих данных, полученных в процессе работы алгоритмов, позволит упростить сбор данных для следующего использования в похожих условиях.

Прогнозирование гранулометрического состава взорванной горной массы на основе учета данных MWD является актуальной производственной 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 порой не учитывают всю уникальную структуру и неоднородность массива, подлежащего взрыву, однако, если при прогнозировании распределения размеров куска породы в развале использовать данные MWD, собранные с каждой пробуренной скважины, а затем скомбинировать их в блочную модель, учитывающую прочностные свойства и все структурные нарушения, обнаруженные в массиве, то это позволит более подробно учесть влияние состояния массива на конечный результат.

Сформулировать задачи будущих исследований по теме MWD можно следующей последовательностью: «Данные MWD» — «физико-механические свойства горных пород и их структура» — «параметры буровзрывных работ» — «гранулометрический состав горной массы» с непосредственной оценкой качества работы данной последовательности на каждом этапе.

Оценка точности и качества работы алгоритма машинного обучения, верификация полученных свойств горных пород и верификация гранулометрического состава также являются важным аспектом будущей работы.

### **Заключение**

Авторами статьи в данной работе был представлен анализ технологии MWD, которая активно развивается и приме-

няется в горнодобывающей отрасли по всему миру.

Был проведен глобальный литературный обзор научных исследований, связанных с получением, обработкой, анализом и использованием параметров MWD для характеристики горных пород, оценки отклонений при бурении, создания моделей заряжаемости скважин, определения зон разрушения от взрыва зарядов ВВ и др. На основе анализа были выявлены наиболее значимые, по мнению авторов, проблемные места, на которые в большинстве исследований сделан акцент, такие, например, как выбор метода фильтрации, нормализации и корреляции данных для конкретных условий.

Также был произведен обзор применения методов машинного обучения, использующих данные MWD для решения различных задач. 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 данного инструмента с получаемыми в режиме реального времени данными MWD позволит снизить затраты на детальное изучение горно-геологических характеристик пород, 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.

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



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khorzoughi M. B.* Use of measurement while drilling techniques for improved rock mass characterization in open-pit mines. Master's Thesis, Vancouver: University of British Columbia, Canada, 2013. DOI: 10.14288/1.0073823. URL: <http://hdl.handle.net/2429/44258> (дата обращения: 26.08.2020).
2. *Zhantao Li, Ken-ichi Itakura, Ma Y.* Survey of measurement-while-drilling technology for small-diameter drilling machines // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014, vol. 19, pp. 10267 – 10282.
3. *Segui J. B., Higgins M.* Blast design using measurement while drilling parameters // *International Journal for Blasting and Fragmentation*. 2002, vol. 6, no. 3-4, pp. 287 – 299. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.12.021.
4. *Van Eldert J., Schunnesson H., Johansson D., Saiang D.* Application of measurement while drilling technology to predict rock mass quality and rock support for tunnelling // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, pp. 1349 – 1358. DOI: 10.1007/s00603-019-01979-2.
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. *Тангаев В. А., Двойников М. В., Егоров Э. К.* Буримость и взрываемость горных пород. – М.: Недра, 1978. – 184 с.
7. *Симкин Б. А., Кутузов Б. Н., Буткин В. Д.* Справочник по бурению на карьерах. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 221 с.
8. *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.
9. *Жариков С. Н.* О способах изучения свойств грунтов для повышения эффективности буровзрывных работ // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2016. – № 6(117). – С. 3–7.
10. *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.
11. *Brown E. T., Barr M. V.* Instrumented drilling as an aid to site investigations / *Proceedings of the 3rd International Congress of the International Association of Engineering Geology*, Madrid, Spain, 4–8 September 1978, pp. 21–28.
12. *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. DOI: 10.14288/1.0095103.
13. *Lopez C., Lopez E., Javier F.* Drilling and blasting of rocks. New York: CRC Press, 1995, 408 p.
14. *Lilly P.* An empirical method of assessing rock mass blastability // *Proceeding of the Large Open Pit Mining Conference*, Newman, Australia, October 1986; pp. 89 – 92.
15. *Liu H., Yin K. K.* Analysis and interpretation of monitored rotary blast hole drill data // *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. 2001, vol. 15, no. 3, pp. 177 – 203. DOI: 10.1076/ijsm.15.3.177.3410.
16. *Scoble M. J., Peck J., Hendricks C.* Correlation between rotary drill performance parameter sand borehole geophysical logging // *Mining Science and Technology*. 1989, vol. 8, pp. 301 – 312.
17. *Peck Tech Consulting.* Functional Requirements Definition for the Compensated Blastability Index (CBI) Algorithm. Peck Tech Consulting: Quebec, Canada, 2009.
18. *Schunnesson H.* RQD Predictions based on drill performance parameters // *International Journal of Tunnel and Underground Space Technology*. 1996, vol.11, pp. 345 – 351.

19. Schunnesson H. Drill process monitoring in percussive drilling for location of structural features, lithological boundaries and rock properties, and for drill productivity evaluation. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 1997.
20. 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.
21. Navarro J., Sanchidrián 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. DOI: 10.1016/j.tust.2017.10.011.
22. Navarro J., Sanchidrián 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. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.060.
23. Navarro J., Schunnesson H., Johansson D., Sanchidrián J. A., Segarra P. Application of drill-monitoring for chargeability assessment in sublevel caving // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 119, pp. 180–192. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.026.
24. 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, 2018, pp. 203–207.
25. 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. **IFAB**

## REFERENCES

1. Khorzoughi M. B. *Use of measurement while drilling techniques for improved rock mass characterization in open-pit mines*. Master's Thesis, Vancouver: University of British Columbia, Canada, 2013. DOI: 10.14288/1.0073823, available at: <http://hdl.handle.net/2429/44258> (accessed 26.08.2020).
2. Zhantao Li, Ken-ichi Itakura, Ma Y. Survey of measurement-while-drilling technology for small-diameter drilling machines. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014, vol. 19, pp. 10267–10282.
3. Segui J. B., Higgins M. Blast design using measurement while drilling parameters. *International Journal for Blasting and Fragmentation*. 2002, vol. 6, no. 3-4, pp. 287–299. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.12.021.
4. Van Eldert J., Schunnesson H., Johansson D., Saiang D. Application of measurement while drilling technology to predict rock mass quality and rock support for tunnelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, pp. 1349–1358. DOI: 10.1007/s00603-019-01979-2.
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. Tangaev V. A., Dvoynikov M. V., Egorov E. K. *Burimost' i vzryvaemost' gornyh porod* [Drillability and blastability of rocks], Moscow, Nedra, 1978, 184 p.
7. Simkin B. A., Kutuzov B. N., Butkin V. D. *Spravochnik po bureniyu na kar'erah*. 2-e izd. [Quarry drilling handbook, 2nd edition], Moscow, Nedra, 1990, 221 p.
8. 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.

9. 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].

10. 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. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2016, no. 4(11), pp. 121–129. [In Russ].

11. Brown E. T., Barr M. V. Instrumented drilling as an aid to site investigations. *Proceedings of the 3rd International Congress of the International Association of Engineering Geology*, Madrid, Spain, 4–8 September 1978, pp. 21–28.

12. 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. DOI: 10.14288/1.0095103.

13. Lopez C., Lopez E., Javier F. *Drilling and blasting of rocks*. New York: CRC Press, 1995, 408 p.

14. Lilly P. An empirical method of assessing rock mass blastability. *Proceeding of the Large Open Pit Mining Conference, Newman, Australia*, October 1986; pp. 89–92.

15. Liu H., Yin K. K. Analysis and interpretation of monitored rotary blast hole drill data. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. 2001, vol. 15, no. 3, pp. 177–203. DOI: 10.1076/ijsm.15.3.177.3410.

16. Scoble M. J., Peck J., Hendricks C. Correlation between rotary drill performance parameter sand borehole geophysical logging. *Mining Science and Technology*. 1989, vol. 8, pp. 301–312.

17. *Peck Tech Consulting. Functional Requirements Definition for the Compensated Blastability Index (CBI) Algorithm*. Peck Tech Consulting: Quebec, Canada, 2009.

18. Schunnesson H. RQD Predictions based on drill performance parameters. *International Journal of Tunnel and Underground Space Technology*. 1996, vol.11, pp. 345–351.

19. Schunnesson H. *Drill process monitoring in percussive drilling for location of structural features, lithological boundaries and rock properties, and for drill productivity evaluation*. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 1997.

20. 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.

21. 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. DOI: 10.1016/j.tust.2017.10.011.

22. 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. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.060.

23. Navarro J., Schunnesson H., Johansson D., Sanchidrián J. A., Segarra P. Application of drill-monitoring for chargeability assessment in sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 119, pp. 180–192. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.026.

24. 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, 2018, pp. 203–207.

25. 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.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ишейский Валентин Александрович<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: Isheyskiy\_VA@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-1007-6562,

Васильев Антон Сергеевич<sup>1</sup> — аспирант, инженер,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Ишейский В.А., e-mail: Isheyskiy\_VA@pers.spmi.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

A.S. *Vasilyev*<sup>1</sup>, Graduate Student, Engineer-Researcher,

<sup>1</sup> 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 27.01.2022; принята к печати 10.02.2022.

Received by the editors 11.01.2022; received after the review 27.01.2022; accepted for printing 10.02.2022.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОННЕЛЬНОЙ ОБДЕЛКИ ОПАСНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ

(2021, № 11, СБ 18, 16 с.)

Саммаль Андрей Сергеевич<sup>1</sup> — профессор, e-mail: assammal@mail.ru,

Войнов Иван Вячеславович<sup>1</sup> — соискатель, e-mail: voinov\_22@mail.ru,

<sup>1</sup> Тульский государственный университет.

Для построения математических моделей использован программный комплекс MIDAS GTS NX. Рассмотрены расчетные случаи влияния на напряженно-деформированное состояние тоннельной обделки локального вывала грунта (ЛВГ), воздействия оползневого процесса (ОП) и заобделочных пустот (ЗП). Установлено, что влияние ЛВГ в тоннель приводит к росту напряжений в своде обделки по трассе тоннельного участка и снижению ее несущей способности. Протекание ОП приводит к неравномерному нагружению обделки, как в поперечном сечении, так и по трассе тоннеля. В первую очередь не выполняется условие трещиностойкости железобетонной обделки, с дальнейшим наступлением предельного состояния первой группы. Интенсивность процесса определяется, прежде всего, соотношением между оползневым и горизонтальным давлением в массиве. Наличие ЗП в грунтовом массиве может привести к возникновению концентраций растягивающих напряжений и снижению запаса несущей способности обделки в 1,5–2 раза и более.

Ключевые слова: тоннель, обделка, грунтовый массив, геомеханический процесс, напряжения, деформации, несущая способность.

### ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DANGEROUS GEOMECHANICAL PROCESSES OCCURRING IN THE GROUND MASS ON STRESS-STRAIN STATE OF TUNNEL LINING

A.S. *Sammal*<sup>1</sup>, Professor, e-mail: assammal@mail.ru, I.V. *Vojnov*<sup>1</sup>, applicant, e-mail: voinov\_22@mail.ru,

<sup>1</sup> Tula State University, 300012, Tula, Russia.

The calculated cases of the influence on the stress-strain state of the tunnel lining of local soil fallout (LVG), the impact of the landslide process (OP) and the sealing voids (PO) are considered. It is established that the influence of LVG in the tunnel leads to an increase in stresses in the lining arch along the tunnel section route and a decrease in its bearing capacity. The flow of the OP leads to uneven loading of the lining, both in cross-section and along the tunnel route. The presence of a PO in the soil mass can lead to the occurrence of concentrations of tensile stresses and a decrease in the margin of the bearing capacity of the lining by 1.5–2 times or more.

Key words: tunnel, lining, soil mass, geomechanical process, stresses, deformations, bearing capacity.