

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 1

УДК 622.026.3

**ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ БУРИМОСТИ
ОТ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПАКИСТАНА**

М. З. Абу Бакар, Я. Мажид

Инженерно-технологический университет,
E-mail: yasirbinmajeed@gmail.com, yasirbinmajeed@uet.edu.pk,
г. Лахор, Пакистан

Определены параметры буримости и комплексный набор физико-механических свойств образцов горных пород, собранных в регионах Пакистана. Для расчета геотехнических показателей абразивности образцов, включающих абразивность по Шимазеку, индекс абразивности и твердость по Виккерсу, выполнен их петрографический анализ. Для проверки зависимости параметров буримости от физико-механических свойств и показателей абразивности породы выполнен однопараметрический регрессионный анализ. Выявлена корреляция параметров буримости с прочностью на одноосное сжатие. Установлено, что *J*-число Сиверса и скорость бурения существенно зависят от абразивности по Шимазеку. Разработаны многопараметрические линейные регрессионные модели для *J*-числа Сиверса, хрупкости и скорости бурения на основе физико-механических и петрографических свойств образцов пород. Подтверждена прогнозирующая способность предложенных моделей различными статистическими показателями.

J-число Сиверса, хрупкость, скорость бурения, абразивность по Шимазеку, индекс абразивности породы, твердость породы по Виккерсу, содержание кварца, эквивалентное содержание кварца

DOI: 10.15372/FTPRPI20240110

EDN: DCNRBS

Прокладка тоннелей, добыча полезных ископаемых и другие геотехнические инженерные проекты зависят от множества факторов, которые могут изменяться в зависимости от стадии развития проекта. Разработка проектов для подземных условий требует оптимального планирования и проектирования [1, 2]. Для этого необходима крупномасштабная выемка геоматериала с использованием различных буровых машин: тоннелепроходческих комплексов; проходческих комбайнов; установок для бурения; комбайнов непрерывного действия; буровых платформ и т. д. Их выбор обусловлен экскавационной производительностью, изменяемой в зависимости от физических, механических, петрографических и классификационных свойств породы [2]. Без знания данных свойств выбор выемочных машин и другого бурового оборудования может привести к непредвиденным проблемам в ходе работы. Согласно [3], на буримость породы влияют геологические параметры и параметры бурового оборудования, классифицирующие

мые как контролируемые и неконтролируемые. Например, тип режущего инструмента, его диаметр, подача, скорость вращения, частота ударов, интенсивность промывки — контролируемые параметры, а физические свойства породы и общие условия породного массива — неконтролируемые.

Буримость горной породы означает влияние ряда факторов на скорость бурения и износ бурового оборудования [4]. Это ключевой параметр, определяющий ход выполнения выемочных работ и их экономическую составляющую, а точная оценка скорости бурения дает возможность эффективно планировать выемочные работы [5]. В горнодобывающей отрасли буримость позволяет классифицировать породы в толщах и играет ключевую роль при выборе выемочного оборудования и режущего инструмента [6, 7]. От этого зависит не только прогнозирование износа инструментов и оборудования, но и ожидаемая скорость бурения. Некорректная оценка буримости приводит к частой смене дорогостоящего оборудования, что значительно уменьшает эффективность буровой машины. Проблема точного прогнозирования скорости бурения и свойств породы актуальна как для проектировщиков и подрядчиков, так и производителей буровых машин горнодобывающей, тоннельной и подземно-строительной отраслей [8].

Первые научные работы по оценке буримости породы проведены в Норвежском университете науки и технологии (NTNU) в начале 1960-х годов XX в. на примере технологии вибробурения [9]. Последние разработки сфокусированы на уточнении и проектировании новых типов испытаний, методов и алгоритмов.

Метод определения буримости NTNU / SINTEF — наиболее используемый метод прогнозирования производительности тоннелепроходческих комплексов и крупнейших механизированных подземных строительных объектов [8]. Он включает в себя ряд испытаний по определению таких параметров, как хрупкость S_{20} , J -число Сиверса (SJ), абразивность (AV), абразивность по стали (AVS), по которым определяются показатели буримости: скорость бурения (DRI); износ коронки (BWI); долговечность резца (CLI). Показатели DRI, BWI и CLI, а также твердость породы по шкале Виккерса (VHNR) позволяют косвенно оценить буримость горной породы [10].

Геомеханические свойства породы влияют на показатели буримости и скорости бурения [3, 6, 11]. Установлено, что прочность на одноосное сжатие, бразильская прочность на растяжение, индексы хрупкости $B_1 - B_4$, модуль деформации, плотность, пористость, скорость распространения ультразвуковых волн, твердость по Шмидту, индекс точечной нагрузки $I_{s(50)}$, твердость по Шору и Мору позволяют оценить возможность бурения породы. При этом во многих работах указывается, что буримость нельзя оценить лишь по одному свойству, например по прочности. Она зависит от большого количества факторов, включающих состав породы, ее структуру, размер зерен и степень выветривания. В [12] выявлена тесная связь между скоростью вибробурения и коэффициентом текстуры породы. В [13, 14] рассчитана буримость горной породы на основе содержания кварца, бразильской прочности на растяжение, скорости распространения P -волны и пористости. В [15] изучена корреляция скорости бурения взрывных скважин с индексом абразивности Cerchar (CAI), твердости по Роквеллу, ударной прочности с другими физико-механическими свойствами породы. В [16] исследована зависимость скорости вибробурения от текстурных параметров выбранных пород. В [17] описана зависимость скорости вибробурения от количественных параметров породы. Параметры, влияющие на производительность бурения, изучены в [4, 18, 19].

Параметры буримости NTNU / SINTEF широко используются для оценки буримости пород при прокладке тоннелей [20]. Аналитический обзор показал, что корреляция DRI с физико-механическими свойствами без учета петрографических свойств исследована в значительной степени. Однако количество работ, описывающих корреляцию параметров буримости по методу NTNU / SINTEF с физическими, механическими и петрографическими свойствами, весьма ограничено [20–22].

Цель настоящей работы — оценка параметров буримости NTNU / SINTEF (DRI, S_{20} и SJ) для ряда магматических, метаморфических и осадочных горных пород, а также выявление зависимостей для косвенной оценки буримости выбранных пород, образцы которых собраны из различных регионов Пакистана. В прикладной геомеханике считается, что эмпирические зависимости позволяют быстрее оценивать различные показатели на основе свойств породы при малых затратах. Подобные прогнозирующие модели различаются в зависимости от региона ввиду локальных тектонических, геологических и экологических условий [20]. Прямое измерение буримости в полевых условиях является трудоемким и финансово затратным мероприятием. Для получения статистически значимых корреляций для оценки буримости рассматриваемых типов горных пород определены параметры DRI, S_{20} , SJ и измерены механические, физические и петрографические свойства. Данная работа будет полезна для действующих и будущих крупномасштабных строительных объектов: возведение ГЭС; прокладка тоннелей; сооружение подземных хранилищ; укладка фундамента больших сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из различных геологических формаций Пакистана собрано 27 породных образцов, включающих магматические, метаморфические и осадочные породы. Выбор пород обусловлен широким диапазоном разных параметров с точки зрения минералогического содержания и геомеханических свойств. В качестве образцов выбраны невыветренные породные блоки без микромакродефектов, позволяющие снизить ошибку выборки. Экспериментальные исследования разделены на три части. В первой определены параметры буримости NTNU / SINTEF, рассчитаны скорости бурения DRI, во второй — петрографические свойства пород (минералогический состав и средний диаметр зерен минералов). Третья часть (экспериментальная) — комплексные испытания по определению физико-механических свойств, для которых из породных блоков брались керны диаметром 54 мм ортогонально плоскостям залегания.

Параметры буримости NTNU / SINTEF. Для определения скорости бурения DRI измерялась хрупкость S_{20} и J-число Сиверса (SJ) в лабораторных условиях по плану из [9]. Окончательное значение S_{20} выбиралось как среднее между тремя независимыми друг от друга измерениями, окончательное SJ — средняя глубина 4–8 миниатюрных скважин. Значение DRI задавалось на основе полученных S_{20} и SJ по графику, представленному в [20].

Петрографический анализ образцов пород. Для определения минералогического состава и размера зерен минералов выполнен анализ шлифов рассматриваемых пород. Размер зерен измерялся методом усреднения максимального и минимального размера зерна (рис. 1), предложенным в [23]. Количественный минералогический состав находился путем подсчета зерен минералов на шлифе с помощью петрографического микроскопа. Результаты петрографического анализа необходимы для расчета эквивалентного содержания кварца EQC и параметров абразивности (абразивности по Шимазеку F_{SHMZK} , индекса абразивности породы RAI, твердости по Виккерсу) [24, 25]:

$$\text{EQC} = \sum_{i=1}^n V_i R_i ,$$

$$F_{\text{SHMZK}} = \frac{\text{BQC} d \text{ BTS}}{100} ,$$

где V — минералогическое содержание, %; R — твердость по шкале Розивала; d — средний размер зерен минералов, мм; BTS — бразильская прочность на растяжение, МПа.

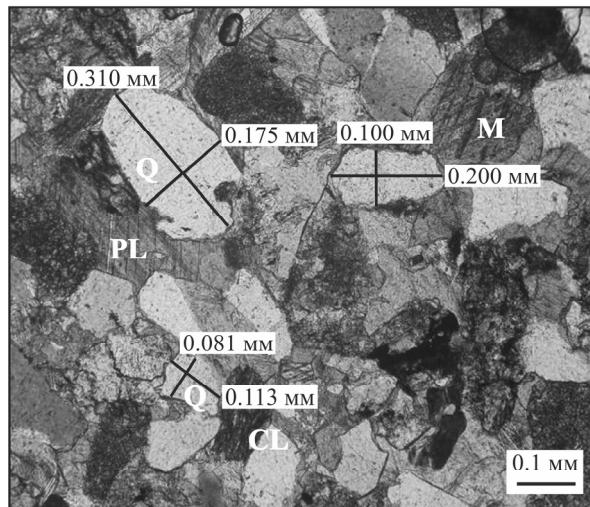


Рис. 1. Расчет размера зерен на примере образца песчаника 2

Значение RAI каждого образца рассчитывалось умножением EQC на соответствующую прочность на одноосное сжатие UCS [25]. Твердость по Виккерсу определялась суммированием твердости отдельных минералов с учетом их содержания в породе:

$$\text{VHNR} = \sum_{i=1}^n \text{MC}_i \text{VHN}_i ,$$

здесь MC — минералогическое содержание, %; VHN — твердость минерала по Виккерсу, МПа; твердость отдельных минералов бралась из [24].

Определение физико-механических свойств. Для выявления зависимости буримости образцов выбранных пород от физико-механических свойств в лабораторных условиях строго по стандартам ASTM рассматривались следующие свойства: прочность на одноосное сжатие UCS; бразильская прочность на растяжение BTS; твердость по отскоку молотка Шмидта SRH; плотность ρ , пористость n ; скорость распространения P -волны V_p . Естественная плотность пород ρ находилась путем деления массы кернов на их объем, объем — на основе средний длины и диаметра керна, измеренных цифровым штангенциркулем. Пористость n определялась методом насыщения, предложенным Международным сообществом механики горных пород для породных образцов стандартных размеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1, 2 представлены результаты экспериментальных исследований 27 породных образцов, включая параметры буримости DRI, S_{20} и SJ и физико-механические свойства.

ТАБЛИЦА 1. Параметры буримости NTNU / SINTEF образцов горных пород

Образец	SJ, мм/10	СКО – SJ, мм/10	KV – SJ	S_{20} , %	СКО – S_{20} , %	KV – S_{20}	DRI
Долерит	1.47	0.64	0.43	40.18	8.60	0.21	30.00
Диорит	3.43	0.69	0.20	23.90	0.46	0.02	18.00
Гранит	3.70	3.34	0.90	43.44	4.09	0.09	37.00
Анdezит	2.40	0.82	0.34	30.36	1.51	0.05	22.00
Гранитный гнейс	57.90	19.75	0.34	60.27	6.39	0.11	68.00
Филит	115.26	8.34	0.07	46.27	4.22	0.09	64.00
Кварцит	1.28	0.56	0.44	54.35	3.16	0.06	45.00
Алеврит	120.76	18.64	0.15	51.65	1.83	0.04	68.00
Песчаник 1	110.76	3.39	0.03	78.14	5.29	0.07	93.00
Песчаник 2	72.52	9.06	0.12	41.90	8.21	0.20	51.00
Песчаник 3	106.00	10.40	0.10	75.50	5.55	0.07	88.00
Песчаник 4	115.12	5.60	0.05	81.91	2.84	0.03	94.00
Песчаник 5	101.00	0.96	0.01	86.81	0.65	0.01	92.00
Песчаник 6	109.50	16.95	0.15	80.38	6.86	0.09	93.00
Песчаник 7	103.52	31.00	0.30	48.86	3.52	0.07	62.00
Песчаник 8	1.34	0.32	0.24	57.28	4.73	0.08	45.00
Песчаник 9	35.74	4.48	0.13	62.00	10.37	0.17	67.00
Доломит 1	46.94	8.75	0.19	51.38	4.15	0.08	58.00
Доломит 2	26.92	6.58	0.24	55.51	1.81	0.03	61.00
Доломит 3	104.30	5.64	0.05	42.48	4.38	0.10	55.00
Известняк 1	80.38	16.32	0.20	51.03	6.13	0.12	63.00
Известняк 2	81.23	7.31	0.09	43.03	2.85	0.07	54.00
Известняк 3	52.13	6.62	0.13	53.18	0.91	0.02	62.00
Известняк 4	67.55	1.16	0.02	50.90	4.38	0.09	60.00
Известняк 5	150.00	13.01	0.09	43.64	8.48	0.19	67.00
Каменный гипс	130.00	8.50	0.07	64.66	0.97	0.01	85.00
Мергель	121.00	21.36	0.18	83.50	1.86	0.02	95.00

П р и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 2: СКО — среднеквадратическое отклонение; KV — коэффициент вариации

В табл. 3 приведены результаты петрографического анализа образцов пород. Основное внимание уделено зависимостям DRI, S_{20} и SJ от физико-механических и петрографических свойств. Для изучения комбинированного влияния породных свойств на параметры буримости использовался многопараметрический регрессионный анализ. На рис. 2, 3 показаны криевые распределения и частотные гистограммы параметров SJ и S_{20} , полученные с помощью программного обеспечения SPSS 7.0. Видно, что S_{20} , ρ , V_p и SRH имеют нормальное распределение, тогда как SJ, UCS, BTS и n подчиняются логнормальному распределению. Нормальное и логнормальное распределения часто используются в работах в области геотехнических наук [26].

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические свойства образцов горных пород

Образец	UCS, МПа	СКО–UCS, МПа	KV–UCS	BTS, МПа	СКО–BTS, МПа	KV–BTS	ρ , г/см ³	n , %	V_p , км/с	SRH
Долерит	140.50	61.95	0.44	13.73	1.98	0.14	3.05	0.12	7.22	55.00
Диорит	231.99	98.83	0.43	18.65	3.36	0.18	3.07	0.53	6.28	35.00
Гранит	44.80	5.64	0.13	3.53	0.89	0.25	2.55	1.40	3.69	36.00
Андезит	231.46	43.72	0.19	14.07	1.11	0.08	3.00	0.40	5.98	49.00
Гранитный гнейс	54.53	12.29	0.23	3.19	0.47	0.15	2.58	1.07	1.78	33.00
Филлит	54.33	25.75	0.47	4.10	1.79	0.44	2.42	7.68	4.97	29.00
Кварцит	56.39	6.61	0.12	4.35	0.77	0.18	2.45	3.27	3.15	45.00
Алеврит	49.30	11.56	0.23	7.36	2.95	0.40	2.69	1.03	5.31	50.00
Песчаник 1	41.55	16.21	0.39	0.48	0.30	0.63	2.18	11.73	2.29	30.00
Песчаник 2	127.60	16.23	0.13	6.38	1.15	0.18	2.62	1.17	5.85	36.00
Песчаник 3	11.04	3.60	0.33	1.31	0.13	0.10	2.28	10.70	2.59	29.45
Песчаник 4	29.04	2.82	0.10	1.87	0.28	0.15	2.11	15.05	2.78	29.30
Песчаник 5	27.09	1.54	0.06	1.61	0.35	0.22	2.29	10.83	2.06	37.70
Песчаник 6	17.07	1.74	0.10	0.86	0.15	0.17	2.51	12.77	1.98	23.75
Песчаник 7	69.04	50.04	0.72	6.10	1.01	0.16	2.49	6.82	4.38	45.00
Песчаник 8	129.79	38.54	0.30	22.67	2.94	0.13	2.64	1.63	3.64	50.00
Песчаник 9	56.76	12.25	0.22	4.20	0.90	0.21	2.60	3.61	5.12	33.60
Доломит 1	144.43	29.54	0.20	11.96	3.62	0.31	2.77	1.23	5.90	43.00
Доломит 2	99.93	38.99	0.39	12.53	1.37	0.11	2.81	0.38	7.26	33.00
Доломит 3	132.70	39.35	0.30	6.65	1.57	0.24	2.50	6.43	5.77	38.00
Известняк 1	65.26	42.21	0.65	5.01	2.31	0.46	2.61	3.48	6.36	28.00
Известняк 2	95.78	34.12	0.36	4.61	2.55	0.55	2.67	0.80	6.12	29.00
Известняк 3	80.70	34.15	0.42	5.64	1.33	0.24	3.17	2.81	6.66	30.00
Известняк 4	69.80	39.03	0.56	3.34	1.52	0.45	2.65	1.37	6.47	29.60
Известняк 5	20.08	5.19	0.26	7.83	0.67	0.09	2.50	6.53	4.78	30.00
Каменный гипс	13.53	3.46	0.26	1.33	0.27	0.20	2.07	18.37	5.38	15.10
Мергель	5.35	0.63	0.12	0.78	0.43	0.55	2.00	24.70	2.29	18.50

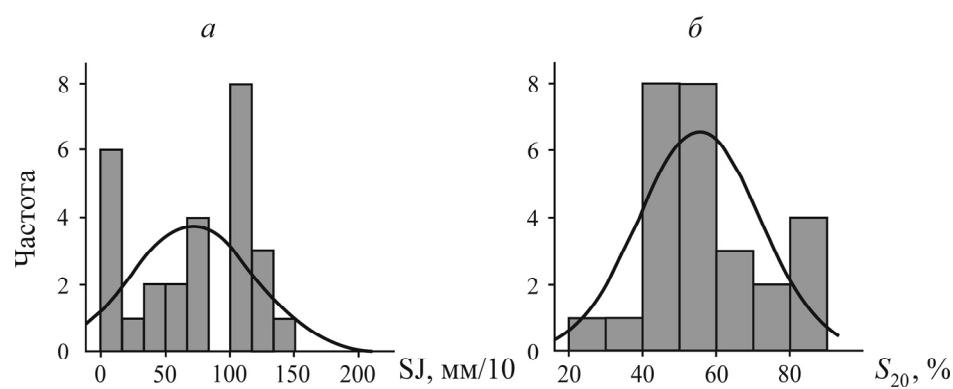
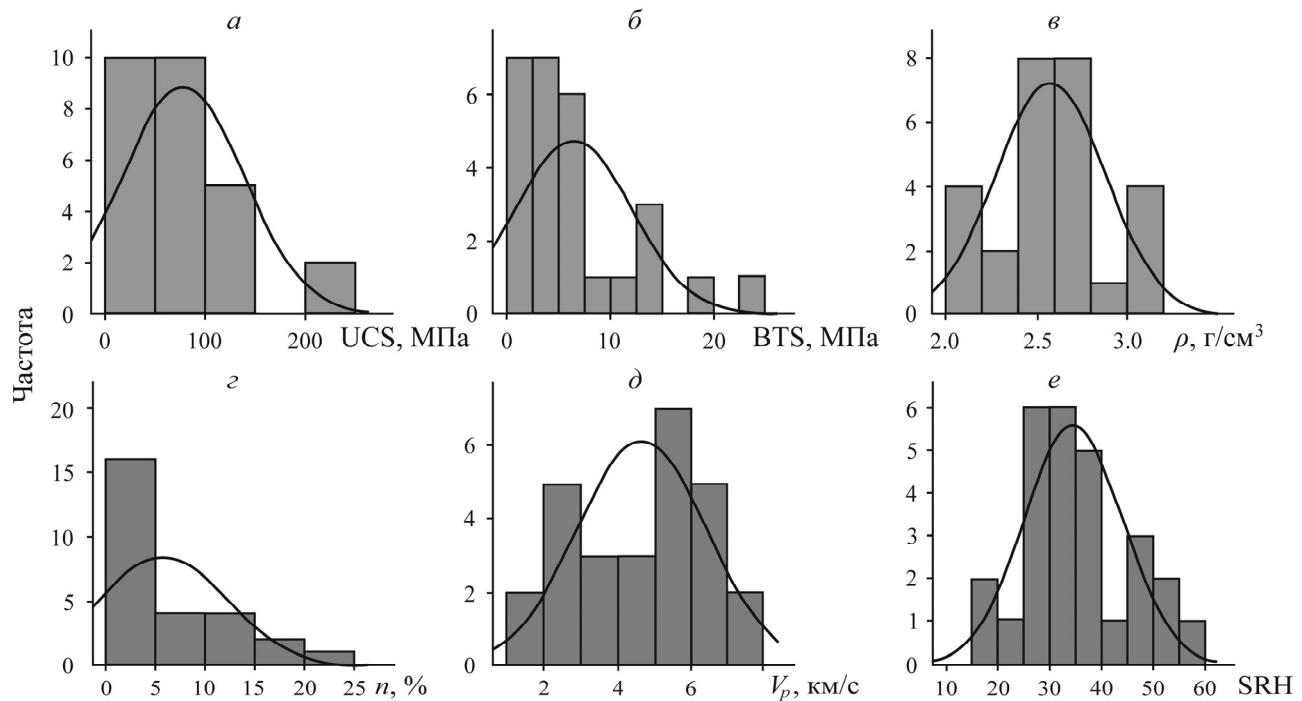


Рис. 2. Распределение параметров буримости NTNU / SINTEF образцов по частоте: *а* — *J*-число Сиверса; *б* — хрупкость S_{20} (частота — количество образцов из выборки 27 шт., попавшее в данный диапазон параметров)

ТАБЛИЦА 3. Петрографические свойства и параметры абразивности образцов

Образец	Q , %	EQC, %	d , мм	F_{SHMZK} , Н/мм	RAI	VHNR, МПа
Долерит	18.00	53.76	0.35	2.89	75.54	7752.00
Диорит	73.00	82.06	0.85	7.70	190.38	10052.00
Гранит	24.60	58.85	1.54	3.41	26.37	8497.00
Андезит	10.00	36.42	0.60	3.44	84.30	6831.00
Гранитный гнейс	75.00	84.43	0.80	1.65	46.04	9878.00
Филит	50.00	53.95	0.78	0.32	29.31	6572.00
Кварцит	90.60	96.78	0.32	3.01	54.57	10726.54
Алеврит	15.20	23.42	0.29	0.48	11.55	3565.19
Песчаник 1	67.00	77.50	0.20	0.09	32.20	9776.60
Песчаник 2	64.00	79.36	0.58	2.87	101.26	9474.35
Песчаник 3	55.50	69.31	0.82	0.38	7.65	8360.66
Песчаник 4	78.00	84.47	0.67	0.91	24.53	10342.19
Песчаник 5	72.50	83.90	0.54	0.25	17.50	8348.14
Песчаник 6	72.50	83.90	0.54	0.31	14.32	9963.62
Песчаник 7	78.00	84.26	0.25	0.48	58.17	10002.00
Песчаник 8	95.00	96.22	0.26	5.91	124.88	10714.24
Песчаник 9	56.00	68.09	0.53	2.04	38.65	8907.45
Доломит 1	2.00	7.04	0.24	0.16	10.17	2312.68
Доломит 2	2.50	7.32	0.43	0.25	7.32	2304.48
Доломит 3	10.00	17.77	0.21	0.19	23.58	3638.45
Известняк 1	0.00	2.62	0.49	0.05	1.71	1418.00
Известняк 2	0.00	2.60	0.49	0.04	2.49	1417.00
Известняк 3	0.00	3.44	1.51	0.19	2.77	1592.85
Известняк 4	0.00	3.32	0.75	0.04	2.32	1618.15
Известняк 5	0.00	3.01	0.13	0.03	0.60	1529.15
Каменный гипс	0.00	0.55	0.36	0.00	0.07	465.15
Мергель	21.00	24.20	0.17	0.02	1.29	2845.60

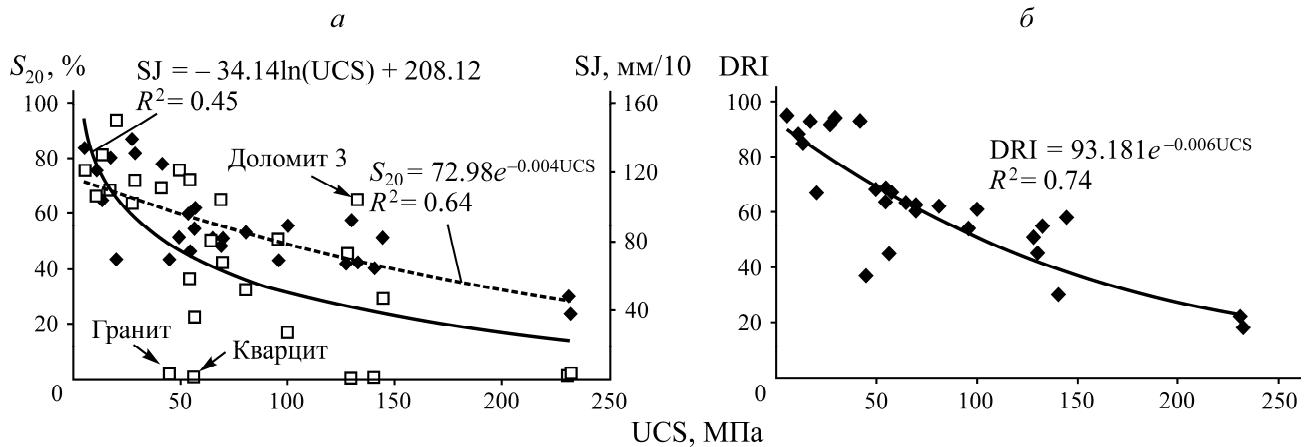
Рис. 3. Распределение физико-механических свойств UCS (a), BTS (b), ρ (c), n (d), V_p (e), SRH (e) образцов по частоте

Установление зависимостей между параметрами буримости и физико-механическими свойствами магматических, метаморфических и осадочных пород выполнялось методом простой статистической регрессии. В табл. 4 приведены результаты линейного регрессионного анализа. В большинстве случаев наблюдалась хорошая отрицательная корреляция между параметрами буримости и физико-механическими свойствами. Однако между параметрами буримости и пористостью n выявлена адекватная положительная корреляция, параметры SJ и S_{20} имеют низкую корреляцию с V_p и SRH соответственно. Низкая корреляция SJ с V_p ($R = -0.32$) обусловлена тем, что SJ применяется для определения поверхностной твердости породы, тогда как V_p — для определения динамических свойств, текстуры, плотности, а также обнаружения микротрещин внутри породы [7, 27]. Хрупкость S_{20} и твердость по Шмидту — косвенные меры оценки прочностных свойств породы. Между ними ожидалась высокая корреляция, но они показали низкую, возможно из-за того, что S_{20} измерялась при повторяющихся ударных воздействиях на образец до его разрушения [9], тогда как твердость по Шмидту — методом неразрушающего определения твердости поверхности. Повышение физико-механических свойств (UCS, BTS, ρ , V_p , SRH) изучаемых пород способствует снижению их параметров буримости и наоборот. При этом повышение пористости n как меры снижения качества породы способствует увеличению параметров буримости. Результаты исследования полностью согласуются с [7, 9, 20–22].

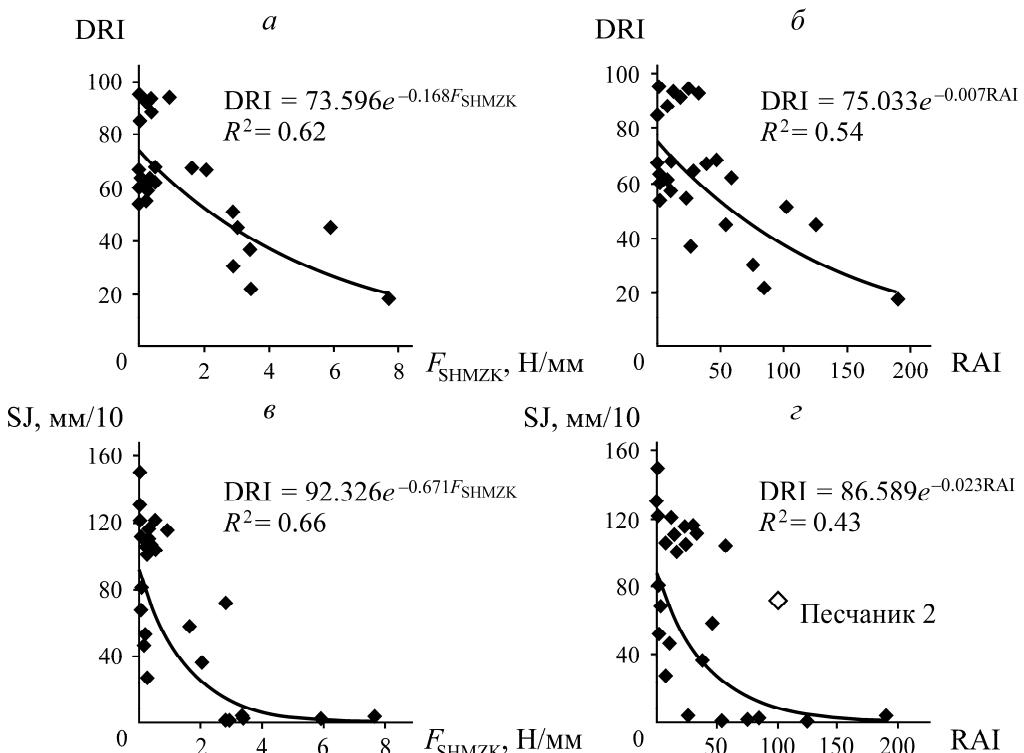
ТАБЛИЦА 4. Коэффициент корреляции DRI, SJ и S_{20} с физико-механическими свойствами

Параметр	SJ, мм/10	S_{20} , %	DRI	UCS, МПа	BTS, МПа	ρ , г/см ³	n , %	V_p , км/с	SRH
SJ, мм/10	1.00								
S_{20} , %	0.48	1.00							
DRI	0.78	0.91	1.00						
UCS, МПа	-0.66	-0.74	-0.83	1.00					
BTS, МПа	-0.63	-0.61	-0.74	0.80	1.00				
ρ , г/см ³	-0.66	-0.72	-0.77	0.74	0.67	1.00			
n , %	0.67	0.74	0.78	-0.63	-0.59	-0.83	1.00		
V_p , км/с	-0.32	-0.74	-0.60	0.59	0.49	0.69	-0.57	1.00	
SRH	-0.56	-0.45	-0.62	0.56	0.63	0.53	-0.64	0.22	1.00

Среди рассмотренных физико-механических свойств только UCS позволяет оптимально прогнозировать SJ, S_{20} и DRI (табл. 4). Выполнен нелинейный однопараметрический регрессионный анализ для прочности на одноосное сжатие с целью получения наиболее правдоподобных регрессионных моделей. Применение логарифмической функции для SJ и экспоненциальной для S_{20} и DRI обеспечивает более точные результаты их оценки при независимой переменной UCS (рис. 4). На рис. 4а видно аномальное отклонение трех точек, принадлежащих образцам гранита, кварцита и доломита 3. Образец гранита принадлежит формации Томбра и имеет крайне низкое UCS (44.80 МПа), что является аномальным. Низкое значение UCS может быть обусловлено выветриванием залегающих слоев или локальным обледенением формации Томбра Восточного соляного хребта в провинции Пенджаб [28]. Образец кварцита также показал крайне низкое SJ (1.28 мм/10), несмотря на низкое UCS (56.39 МПа). Такой несвойственный характер обусловлен крайне высоким EQC (96.78 %). Образец доломита 3 имеет относительно высокое SJ (104.3 мм/10) при высоком UCS (132.70 МПа), что объясняется низким EQC (17.77 %).

Рис. 4. Корреляция SJ и S_{20} с прочностью на одноосное сжатие UCS (а), DRI с UCS (б)

На рис. 5 приведены результаты регрессионного анализа зависимостей DRI и SJ от F_{SHMZK} и RAI и выявлены экспоненциальные функции. В общем виде корреляции демонстрируют экспоненциальное снижение DRI и SJ образцов пород с ростом F_{SHMZK} и RAI. Научные работы, описывающие зависимость DRI и SJ от абразивности, не найдены, при этом полученные результаты согласуются с результатами [29], где предлагается новый метод оценки абразивности породы по объему внедрения врачающегося диска. Внедрение уменьшалось с увеличением содержания кварца, EQC и VHNR. На рис. 5в показано аномальное значение SJ (72.52 мм/10) при высоком RAI (101.26) для образца “Песчаник 2” из формации Мури ($Q=64.00\%$, EQC = 79.36 %, UCS = 127.60 МПа). Причина неожиданно высокого SJ заключается в умеренном и эквивалентном содержании кварца, несмотря на умеренно высокое UCS (127.60 МПа).

Рис. 5. Корреляция между: а — DRI и F_{SHMZK} ; б — DRI и RAI; в — SJ и F_{SHMZK} ; г — SJ и RAI

На рис. 6 приведены регрессионные зависимости хрупкости S_{20} от F_{SHMZK} и RAI. Данные корреляции описываются статистически слабыми убывающими экспоненциальными функциями. Общий убывающий характер S_{20} с увеличением F_{SHMZK} и RAI показывает, что BTS и UCS прямым образом влияют на параметры абразивности, т. е. представляют собой множественный фактор наряду с эквивалентным содержанием кварца при расчете F_{SHMZK} и RAI. Отметим, что с логической точки зрения S_{20} не зависит напрямую от петрографических свойств породы, включающих содержание кварца Q , эквивалентное содержание кварца EQC и средний размер зерен минералов d , поэтому ожидается весьма слабая корреляция между S_{20} и параметрами абразивности.

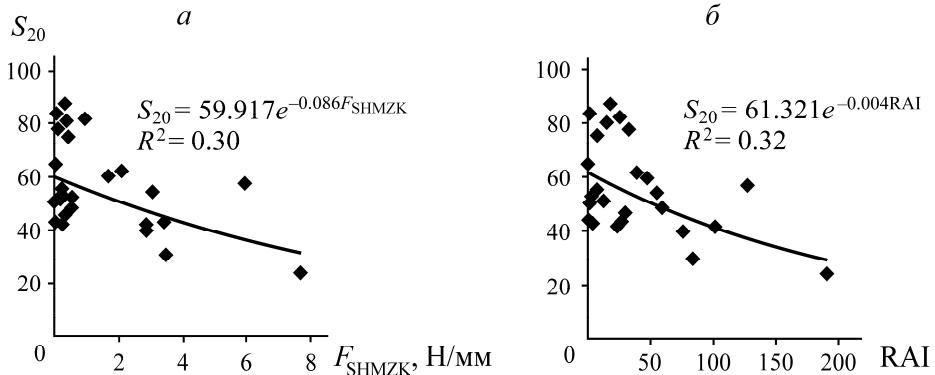


Рис. 6. Корреляция между S_{20} и F_{SHMZK} (*a*), S_{20} и RAI (*b*)

Выполнен регрессионный анализ зависимости DRI, SJ и S_{20} от VHNR. Возможные корреляции не найдены. Тем не менее поиск корреляций VHNR с другими свойствами показал, что VHNR коррелирует с содержанием кварца Q и эквивалентным содержанием кварца EQC (рис. 7). В обновленных прогнозирующих моделях NTNU твердость по Виккерсу применяется для оценки ресурса резцов традиционных буровых машин и при прокладке тоннелей взрывным методом [10].

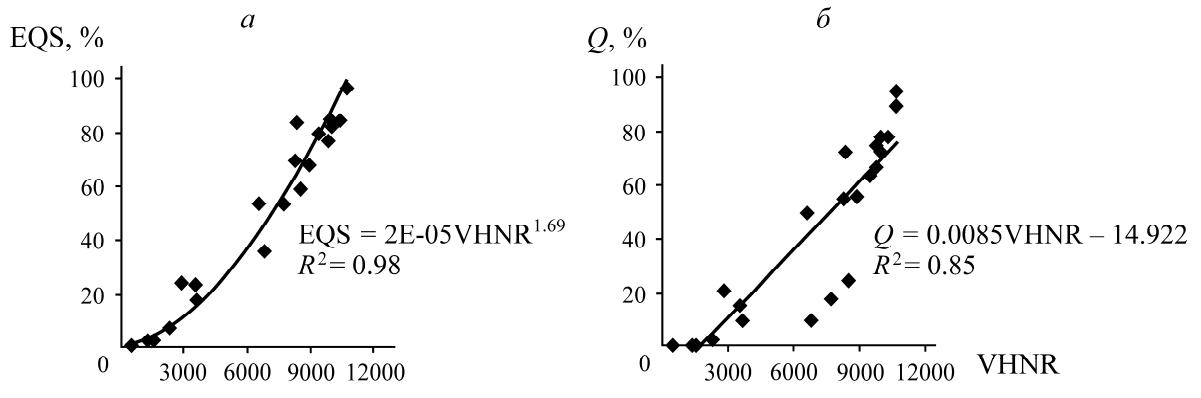


Рис. 7. Корреляция между EQC и VHNR (*a*), Q и VHNR (*b*)

Разработаны многопараметрические регрессионные модели для оценки буримости горных пород на основе механических, физических и петрографических параметров. Метод многопараметрического регрессионного анализа позволяет получить более надежные, достоверные и точные прогнозирующие уравнения по сравнению с простым однопараметрическим регрессионным анализом [20]. В общем виде функция многопараметрической линейной регрессии имеет вид: $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$ (X_1, X_2, X_n — независимые переменные, β_0 — постоянная).

Для выявления зависимости и изменения параметров буримости NTNU / SINTEF относительно свойств образцов в программном обеспечении SPSS 21.0 построены пошаговые много-параметрические линейные регрессионные модели при доверительном интервале 90 % ($\alpha = 0.1$). Метод пошаговой многопараметрической регрессии сочетает в себе прямой отбор и обратное удаление [31, 31]. В рамках многопараметрического регрессионного анализа DRI, S_{20} и SJ рассмотрены в качестве зависимых переменных, а содержание кварца Q , эквивалентное содержание кварца EQC, средний размер зерен минералов d , абразивность по Шимазеку F_{SHMZK} , RAI, VNR, UCS, BTS, ρ , n , V_p и SRH — в качестве независимых.

В табл. 5 приведены результаты (коэффициенты и итоговые значения других статистических параметров) пошагового многопараметрического линейного регрессионного анализа. Отметим, что p -значения всех независимых переменных, участвующих в моделях 1–3, которые меньше предустановленного уровня значимости $\alpha = 0.1$, являются значимыми в прогнозировании зависимых переменных при заданных условиях. Все статистически незначимые независимые переменные ($p > \alpha = 0.1$) исключены из разработки моделей. В модели использовалась встроенная в программное обеспечение SPSS функция проверки мультиколлинеарности. Фактор инфляции дисперсии VIF — наиболее применяемый показатель для определения мультиколлинеарности [31]. В [32] для пошагового многопараметрического регрессионного анализа рекомендован верхний порог VIF, равный 10. Для моделей 1–3 значения VIF всех независимых переменных попадают в допустимый диапазон, означая, что предлагаемые модели не обладают мультиколлинеарностью в высокой степени.

ТАБЛИЦА 5. Результаты пошагового многопараметрического линейного анализа

Модель 1. Зависимая переменная DRI				Модель 2. Зависимая переменная S_{20}				Модель 3. Зависимая переменная SJ			
Нестандартные коэффициенты независимых переменных											
	<i>B</i>	Значимость	VIF		<i>B</i>	Значимость	VIF		<i>B</i>	Значимость	VIF
<i>s</i>	69.294	0.000	—	<i>s</i>	72.850	0.000	—	<i>s</i>	63.956	0.000	—
UCS	-0.142	0.006	2.396	UCS	-0.088	0.033	1.901	F_{SHMZK}	-31.277	0.001	9.650
<i>n</i>	1.449	0.001	1.654	V_p	-3.279	0.016	1.706	<i>n</i>	3.235	0.001	1.214
F_{SHMZK}	-2.812	0.036	1.754	<i>n</i>	0.862	0.027	1.842	RAI	0.828	0.023	9.302

Примечание. *s* — постоянная.

Выполнен дисперсионный анализ — метод статистического анализа количественных данных [33]. В табл. 6 представлены статистические данные для оценки значимости разработанных моделей. Коэффициент корреляции R моделей рассчитывался в ходе дисперсионного анализа путем вычисления квадратного корня из соотношения суммы квадратов регрессии (SSR) к общей сумме квадратов (SST). Коэффициенты корреляции ($R=91, 87, 86\%$) для моделей 1–3 демонстрируют сильную взаимосвязь между зависимыми и независимыми переменными. Среднеквадратическое отклонение разработанных моделей 1–3 составило 9.46, 8.74 и 28.84 соответственно, скорректированные значения $R^2 = 81, 72$ и 71 % от общей дисперсии DRI, S_{20} и SJ.

Проверка гипотезы для разработанных моделей выполнялась по статистическому F -тесту в рамках дисперсионного анализа. Нулевая гипотеза H_0 показала, что связь между зависимыми и независимыми переменными в предлагаемых моделях отсутствует. Альтернативная гипотеза H_a обратна нулевой. В форме условия данные гипотезы выглядят следующим образом:

если $F_{\text{модели}} < F_{\text{крит}}$, то подтверждается H_0 и отклоняется H_a ,

если $F_{\text{модели}} > F_{\text{крит}}$, то подтверждается H_0 или отклоняется H_a .

С помощью таблицы распределения F -критерия получено его критическое значение при $\alpha = 0.1$, $df_1 = 3$, $df_2 = 23$, которое для предлагаемых моделей составило 2.34. F -критерий для моделей 1–3 составил 38.01, 22.96 и 21.68 соответственно, что отклоняет нулевую гипотезу. Это доказывает существование линейных корреляций между зависимыми и независимыми переменными, рассмотренных в соответствующих функциях (табл. 6).

ТАБЛИЦА 6. Результаты дисперсионного анализа для зависимых переменных

Модель 1				Модель 2				Модель 3			
	Сумма квадратов	df	Средний квадрат		Сумма квадратов	df	Средний квадрат		Сумма квадратов	df	Средний квадрат
SSR	10206.6	3	3402.2	SSR	5259.2	3	1753.0	SSR	43441.0	3	14480.4
SSE	2058.8	23	89.5	SSE	1756.0	23	76.4	SSE	15364.6	23	668.0
Итого SST	12265.4	26		Итого SST	7015.2	26		Итого SST	58805.6	26	
F_{equation}	38.01			F_{equation}	22.96			F_{equation}	21.68		
p	0.00			p	0.00			p	0.00		
$R = \sqrt{\text{SSR} / \text{SST}}$	0.91			$R = \sqrt{\text{SSR} / \text{SST}}$	0.87			$R = \sqrt{\text{SSR} / \text{SST}}$	0.86		
$R^2 = \text{SSR} / \text{SST}$	0.83			$R^2 = \text{SSR} / \text{SST}$	0.75			$R^2 = \text{SSR} / \text{SST}$	0.74		
Скорректированное R^2	0.81			Скорректированное R^2	0.72			Скорректированное R^2	0.71		
Стандартная ошибка	9.46			Стандартная ошибка	8.74			Стандартная ошибка	25.84		

Оценка достоверности прогнозирования предлагаемых моделей выполнялась на основе статистических показателей VAF и RMSE. Чем выше значение VAF, тем более точны результаты прогнозирования и наоборот. С другой стороны, чем меньше RMSE, тем более достоверна модель; RMSE также позволяет оценить погрешность модели [31, 34]. Для модели 1 VAF и RMSE составили 85.52 %, 9.00, для модели 2 — 72.41 %, 8.89, для модели 3 — 73.86 %, 23.88, что подтверждает достоверность, надежность и точность моделей 1 и 2 для прогнозирования DRI и S_{20} . В случае с показателем SJ (модель 3), значение RMSE составило 23.88, что может быть обусловлено большим значением VIF между независимыми переменными F_{SHMZK} и RAI.

ВЫВОДЫ

Дана оценка зависимости параметров буримости горной породы DRI, SJ и S_{20} от ее геотехнических свойств. На примере 27 образцов горных пород проведены экспериментальные исследования, включающие определение DRI, SJ и S_{20} , петрографический анализ и физико-механические свойства. Петрографический анализ необходим для определения параметров абразивности образцов породы (абразивность по Шимазеку, RAI, VHNR).

Согласно результатам простого линейного регрессионного анализа, прочность на одноосное сжатие — наиболее подходящая независимая переменная для прогнозирования SJ, S_{20} и DRI. Выполнен нелинейный однопараметрический регрессионный анализ для получения прочности на одноосное сжатие. Выявлено, что логарифмическая функция для SJ и экспоненциальная функция для S_{20} и DRI обеспечивают наиболее точные результаты оценки на основе прочности на одноосное сжатие в качестве параметра регрессии.

Поскольку в научной литературе нет работ, описывающих взаимосвязь параметров буримости NTNU/SINTEF с F-фактором и показателем абразивности породы RAI, сделана попытка выявить корреляции DRI, SJ и S_{20} с VHNR, однако значимые зависимости не найдены. Обнаружена сильная возрастающая корреляция VHNR с содержанием кварца и эквивалентным содержанием кварца.

Для прогнозирования SJ, S_{20} и DRI на основе геомеханических и петрографических свойств породы предложены многопараметрические линейные регрессионные модели, покрывающие 81, 72 и 71 % общей дисперсии зависимых переменных DRI, S_{20} и SJ соответственно.

Результаты проверки достоверности моделей показали, что многопараметрические модели для прогнозирования DRI и S_{20} являются статистически достоверными, так как имеют минимальные значения RMSE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Peila D. and Pelizza S.** Ground probing and treatments in rock TBM, tunnel to overcome limiting conditions, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2009, Vol. 45, No. 6. — P. 602–619.
2. **Yarali O. and Soyer E.** The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability, Scientific Research Essays, 2011, Vol. 6, No. 5. — P. 1077–1088.
3. **Kahraman S., Bilgin N., and Feridunoglu C.** Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, Vol. 40, No. 5. — P. 711–723.
4. **Thuro K. and Spaun G.** Introducing the destruction work as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill and blast tunnelling, Eurock'96 Prediction an Performance Rock Mech. and Rock Eng., Torino, 1996, Vol. 2. — P. 707–720.
5. **Kahraman S., Balci C., Yazici S., and Bilgin N.** Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2000, Vol. 37. — P. 729–743.
6. **Tanaino A. S.** Rock classification by drillability, Part I: Analysis of the available classifications, J. Min. Sci., 2005, Vol. 41. — P. 541–549.
7. **Yarali O. and Soyer E.** Assessment of relationships between drilling rate index and mechanical properties of rocks, Tunnel. Underground Space Technol., 2013, Vol. 33. — P. 46–53.
8. **Dahl F., Grøv E., and Breivik T.** Development of a new direct test method for estimating cutter life, based on the Sievers' J miniature drill test, Tunnel. Underground Space Technol., 2007, Vol. 22. — P. 106–116.
9. **Dahl F., Bruland A., Jakobsen P. D., Nilsen B., and Grøv E.** Classification of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method, Tunnel. Underground Space Technol., 2012, Vol. 28. — P. 150–158.
10. **Zare S. and Bruland A.** Applications of NTNU/SINTEF drillability indices in hard rock tunneling, Rock Mech. Rock Eng., 2013, Vol. 46. — P. 179–187.

11. Ataei M., Kakaie R., Ghavidel M., and Saeidi O. Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2015, Vol. 73. — P. 130–138.
12. Howarth D. F. and Rowland J. C. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties, *Rock Mech. Rock Eng.*, 1987, Vol. 20. — P. 57–85.
13. Akcin N. A., Muftuoglu Y. V., and Bas N. Prediction of drilling performance for electro-hydraulic percussive drills, *Proc. 3RD Int. Symp. Mine Planning Equipment Selection*, Balkema, Istambul, Turkey, 1994. — P. 483–488.
14. Kahraman S. Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1999, Vol. 36. — P. 981–989.
15. Bilgin N. and Kahraman S. Drillability prediction in rotary blast hole drilling, *Proc. 18th Int. Min. Congress Exhibition Turkey, Antalya, Turkey*, 2003. — P. 177–182.
16. Adebayo B. and Akande J. M. Textural properties of rocks for penetration rate prediction, *Daffodil Int. University J. Sci. Technol.*, 2011, Vol. 6, No. 1. — P. 1–8.
17. Hoseinie S. H., Ataei M., and Mikaeil R. Effects of microfabric on drillability of rocks, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2017.
18. Chen J. F. and Vogler U. W. Rock cuttability/boreability assessment research at CSIR, *Proc. Tuncon'92, Design and Construction of Tunnels*, Maseru, South African National Council on Tunnelling, Yeoville, 1992. — P. 91–98.
19. Lislerud A. Hard rock tunnel boring: prognosis and costs, *Tunnel. Underground Space Technol.*, 1988, Vol. 3, No. 1. — P. 9–17.
20. Aligholi S., Lashkaripour G. R., Ghafoori M., and Azali S. T. Evaluating the relationship between NTNU/SINTEF drillability indices with index properties and petrographic data of hard igneous rocks, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2017, Vol. 50. — P. 2929–2953.
21. Yetkin M. E., Ozfirat M. K., Yenice H., Simsir F., and Kahraman B. Examining the relation between rock mass cuttability index and rock drilling properties, *J. African Earth Sci.*, 2016, Vol. 124. — P. 151–158.
22. Capik M., Yilmaz A. O., and Yasar S. Relations between the drilling rate index and physico-mechanical rock properties, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2016.
23. Paschen D. Petrographic and geomechanical characterization of Ruhr area carboniferous rocks for the determination of their wear behavior, PhD dissertation, Technische Universität Clausthal, 1980. — P. 202.
24. Verhoef P. N. W. Wear of rock cutting tools (Implications for the site investigation of rock dredging projects), A. A. Balkema, 1997.
25. Plinninger R. J., Spaun G., and Thuro K. Prediction and classification of tool wear in drill and blast tunneling, *Proc. 9th IAEG Congress Eng. Geol. Developing Countries*, 2002. — P. 2226–2236.
26. Jin D., Yuan D., Li X., and Su W. Probabilistic analysis of the disc cutter failure during TBM tunneling in hard rock, *Tunnel. Underground Space Technol.*, 2021, Vol. 109. — 103744.
27. Altindag R. Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks, *J. Southern African Institute Min. Metall.*, 2012, Vol. 112. — P. 229–237.
28. Shah S. M. I. Stratigraphy of Pakistan, *MEMOIRS of the Geological Survey of Pakistan*, Quetta, 2009, Vol. 22. — P. 1–355.
29. Macias F. J., Dahl F., and Bruland A. New rock abrasivity test method for tool life assessments on hard tunnel boring: The rolling indentation abrasion test (RIAT), *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016, Vol. 49, No. 5. — P. 1679–1693.

30. **Majeed Y. and Abu Bakar M. Z.** Statistical evaluation of Cerchar abrasivity index (CAI) measurement methods and dependence on petrographic and mechanical properties of selected rocks of Pakistan, Bull. Eng. Geol. Env., 2016, Vol. 75, No. 3. — P. 1341 – 1360.
31. **Yilmaz N. G., Yurdakul M., and Goktan R. M.** Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, Vol. 44. — P. 962 – 970.
32. **Hair J. F., Black W. C., Babin B. J., and Anderson R. E.** Multivariate data analysis, 7th Edition, Prentice Hall, New York, 2009.
33. **Deliormanli A. H.** Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones, Construction Building Materials, 2012, Vol. 30. — P. 16 – 21.
34. **Gokceoglu C. and Zorlu K.** A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock, Eng. Applicat. Artificial Intelligence, 2004, Vol. 17. — P. 61 – 72.

Поступила в редакцию 05/III 2022

После доработки 23/XI 2023

Принята к публикации 24/I 2024