

УДК 622.03; 622.016

**ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
РУД И ГОРНЫХ ПОРОД, ПОДВЕРГШИХСЯ ЗАТОПЛЕНИЮ**

**А. А. Еременко¹, Т. П. Дарбинян², Ю. Н. Шапошник¹,
О. М. Усольцева¹, П. А. Цой¹**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: eremenko@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия
²ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”, E-mail: DarbinyanTP@nornik.ru,
пл. Гвардейская, 2, 663302, г. Норильск, Россия

Исследованы физико-механические свойства роговика, габбро-долерита и богатой халькопирит-пирротиновой руды Октябрьского месторождения Талнахского рудного узла, подвергшихся затоплению. Анализ петрографии, элементного и минералогического состава образцов показал, что существенных различий в их свойствах после затопления не наблюдается. Сравнение деформационно-прочностных характеристик при испытаниях горных пород и руды на одноосное сжатие и растяжение демонстрирует их уменьшение в водонасыщенном и увеличение в высушенном состоянии при комнатной температуре. Пределы прочности, модули упругости, сцепления и углы внутреннего трения имеют меньшие значения после высушивания, чем в исходном состоянии.

Месторождение, руда, горные породы, затопление, самовозгорание, окисляемость, прочность, элементный состав, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения, напряжение

DOI: 10.15372/FTPRPI20230503

Сплошные сульфидные руды Талнахского рудного узла склонны к развитию окислительных процессов и самовозгоранию, в том числе за счет накопления естественной влаги. При производстве горнопроходческих работ на руднике “Октябрьский” произошел прорыв воды с водоносного слоя на гор. – 350 м, вследствие чего оказались затоплены горные выработки на рудниках “Октябрьский” (гор. – 906 ÷ – 1048 м) и “Таймырский” (гор. – 1050 ÷ – 1300 м). Постепенная откачка воды из горных выработок осуществлялась более 2 мес.

Для отработки богатых руд на участках западного и восточного флангов залежи X1-0, C-2, C-3, C-4 и др. (рис. 1) предусматривалась система разработки с полной закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [1]. Основные компоненты руд — никель, медь, кобальт, попутные — платина, серебро, золото, селен, теллур и сера, вредные примеси — цинк,

Исследование выполнено в рамках проекта НИР (номер гос. регистрации 121051900145-1).

свинец, олово, сурьма и мышьяк. Залежи имеют форму линз широтного и субширотного простирания, их длина колеблется от 1200 до 1600 м при ширине 350–650 м. Средняя мощность залежей 20–24 м [2].

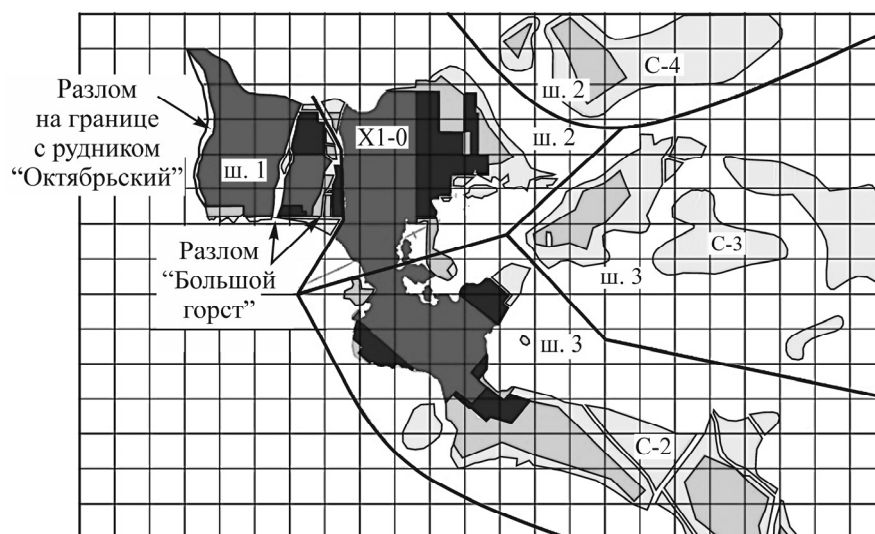


Рис. 1. Расположение рудных залежей X1-0, C-2–C-4 и шахт ш. 1–ш. 3

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения информации о физико-механических и деформационно-прочностных характеристиках горных пород, подвергшихся затоплению на месторождении, а также для оценки условий обеспечения устойчивости выработок и камер в шахтном поле проведены исследования отобранных штучных образцов роговика, габбро-долерита и богатой сульфидной руды. Технология отбора проб обеспечивала максимальное сохранение представительности руды или породы в пробе по составу, строению и состоянию [3, 4]. В качестве проб использовались монолиты. Их число и размеры определялись в зависимости от количества литологических разностей, вида намечаемых испытаний и числа изготавливаемых из проб образцов, подвергаемых испытаниям (с учетом повторяемости испытаний для вычисления коэффициентов вариации показателей, характеризующих неоднородность породы). Пробы помещали в герметичные пакеты из воздухонепроницаемого материала, перед герметизацией пакета воздух из него удаляли. Место отбора проб — Октябрьское месторождение в поле рудника «Таймырский», залежь C-4 (гор. – 1500 м).

В месте отбора проб подстилающие породы представлены роговиками, надрудная толща — габбро-долеритами (табл. 1). При петрографическом исследовании различия образцов пород до затопления и после него не выявлены. Незначительно отличаются друг от друга образцы роговика: в образце после затопления преобладает эпидот и в большей степени развит хлорит, в образце до затопления — амфибол и развит кварц. По минеральному составу богатые руды залежи C-4 халькопиритовые (талнахитовые) халькопирит-кубанитовые, реже кубанит-талнахитовые (моихукитовые), богатые руды залежей C-2, C-3 в основном пирротиновые, богатые руды залежи X1-0 — халькопирит-пирротиновые, реже пентландит-халькопирит-пирротиновые (по классификации В. Я. Манакова склонны к самовозгоранию). Богатые руды залежи C-4 по минеральному составу практически одинаковы с богатыми рудами залежей C-2, C-3 и X1-0, в связи с чем места отбора проб приняты в границах залежи C-4.

ТАБЛИЦА 1. Петрографическое описание проб горных пород

Образец	До затопления	После затопления
Роговик	Порода от скрытокристаллической до мелкокристаллической. Выделяются редкие кристаллы кварца и амфибола. Текстура массивная, крупнопятнистая (фрагмент маленький). Цвет темно-серый. Высокая прочность. Порода преимущественно силикатного состава. Состав, %: амфибол — 40; эпидот — 25; плагиоклаз — 20; хлорит — 10; кварц — 5	Порода от скрытокристаллической до мелкокристаллической. Текстура массивная, крупнопятнистая (фрагмент маленький). Цвет серый. Высокая прочность. Порода преимущественно силикатного состава. Состав, %: эпидот — 35; амфибол — 30; плагиоклаз — 20; хлорит — 12; кварц — 3
Габбро-долерит	Порода мелкокристаллическая. Текстура офитовая. Цвет темно-серый. Состав, %: плагиоклаз — 55; пироксен — 35; хлорит-актинолитовая основная масса — 10	Порода мелкокристаллическая. Текстура офитовая. Цвет темно-серый. Состав, %: плагиоклаз — 55; пироксен — 35; хлорит-актинолитовая основная масса — 10
Руда	Порода разнокристаллическая. Кристаллы неправильной формы, кроме магнетита, который представлен вкрапленниками октаэдрического габитуса. Состав сливных руд, %: пирротин — 75; халькопирит и его разновидности — 15; пирит — 3; магнетит — 2; нерудные минералы (пироксен, оливин, плагиоклаз) — 5	Порода разнокристаллическая. Кристаллы неправильной формы, кроме магнетита, который представлен вкрапленниками октаэдрического габитуса. Состав сливных руд, %: пирротин — 75; халькопирит и его разновидности — 15; пирит — 3; магнетит — 2; нерудные минералы (пироксен, оливин, плагиоклаз) — 5

Для исследования элементного и минералогического состава отобраны шесть типов образцов горных пород: роговик, габбро-долерит и руда до затопления; они же после затопления. Образцы заливались эпоксидной смолой, отшлифовывались, затем отполировывались алмазными суспензиями Struers DP-Suspension P на шлифовально-полировальном аппарате Struers RotoPol-35. Элементный состав образцов определялся методом энергодисперсионной спектроскопии с помощью электронного микроскопа Hitachi-3400N с приставкой Oxford Instruments. Обработка проводилась с помощью программного обеспечения INCA.

Результаты элементного и минералогического состава вмещающих пород и руды до и после затопления приведены в табл. 2, 3. По результатам анализа элементного состава образцов роговика, габбро-долерита и богатой сплошной халькопирит-пирротиновой руды установлено, что различия весового содержания одинаковых химических элементов всех образцов не существенны. Незначительные различия объясняются тем, что результаты — это среднее значение сканирования в трех случайных точках поверхности образца.

ТАБЛИЦА 2. Элементный состав руды весовой до и после затопления, %

Элемент	До затопления	После затопления
S	38.56	39.63
Fe	40.42	49.41
Ni	0.54	2.98
Cu	20.48	7.98

ТАБЛИЦА 3. Элементный состав образцов вмещающих пород до и после затопления, %

Элемент	Весовой		Формула	Соединение	
	до затопления	после затопления		до затопления	после затопления
Роговик					
Na	0.58	0.07	Na ₂ O	0.78	0.09
Mg	1.92	2.18	MgO	3.19	3.61
Al	9.74	9.52	Al ₂ O ₃	18.41	17.99
Si	29.63	29.06	SiO ₂	63.39	62.16
K	6.56	5.62	K ₂ O	7.91	6.77
Ti	0.50	0.53	TiO ₂	0.84	0.88
Fe	4.26	6.13	FeO	5.49	7.88
O	46.79	46.46	CaO	0.00	0.62
Ca	0.00	0.44	—	—	—
Габбро-долерит					
Na	2.11	1.66	Na ₂ O	2.85	2.23
Mg	3.35	3.50	MgO	5.55	5.80
Al	9.57	9.01	Al ₂ O ₃	18.08	17.02
Si	23.90	24.18	SiO ₂	51.14	51.73
K	0.83	1.09	K ₂ O	1.00	1.31
Ca	6.90	7.51	CaO	9.66	10.50
Ti	0.58	0.72	TiO ₂	0.96	1.21
Mn	0.11	0.05	MnO	0.13	0.06
Fe	8.27	7.87	FeO	10.63	10.13
O	44.39	44.41	—	—	—

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из штучных образцов роговика, габбро-долерита и богатой сульфидной руды, подвергшихся затоплению, изготавливались лабораторные образцы для определения деформационно-прочностных свойств. Они испытывались в естественном состоянии, водонасыщенном (насыщение водой в лабораторных условиях до постоянной массы), а также высушенном при комнатной температуре после водонасыщения. Испытания проводились при одноосном сжатии [5, 6] и растяжении [7], затем определялись соответствующие пределы прочности. Паспорта прочности строились по результатам одноосного сжатия и растяжения п. 1 [8]. Результаты деформационно-прочностных характеристик образцов приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Деформационно-прочностные характеристики образцов после затопления

Образец	Состояние	σ^c , МПа	E , ГПа	ν	σ^p , МПа	C , МПа	ϕ , град
Роговик, гор. – 1350 м	Естественное	127.8	31.406	0.189	14.6	21.6	52.6
	Водонасыщенное	78.7	11.962	0.230	9.4	13.6	51.9
	Высушенное	109.5	29.058	0.199	12.9	18.8	52.1
Роговик, гор. – 1418 м	Естественное	56.3	13.523	0.182	9.0	11.3	46.4
	Водонасыщенное	28.3	2.533	0.227	6.4	6.7	39.1
	Высушенное	48.7	12.745	0.201	8.3	10.1	45.1
Габбро-долерит	Естественное	285.0	50.475	0.148	19.9	37.7	60.4
	Водонасыщенное	115.6	29.168	0.181	13.9	20.0	51.8
	Высушенное	169.2	39.849	0.150	18.1	27.7	53.8
Богатая сульфидная руда	Естественное	55.8	26.712	0.203	5.7	8.9	54.6
	Водонасыщенное	32.5	10.939	0.212	3.9	5.6	51.8
	Высушенное	40.4	12.115	0.224	4.6	6.8	52.7

Примечание. σ^c , σ^p — предел прочности при одноосном сжатии и растяжении; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; C — сцепление; ϕ — угол внутреннего трения.

Примеры построения паспорта прочности для роговика (гор. – 1350 м) по результатам испытаний на одноосное сжатие и растяжение, представлены на рис. 2.

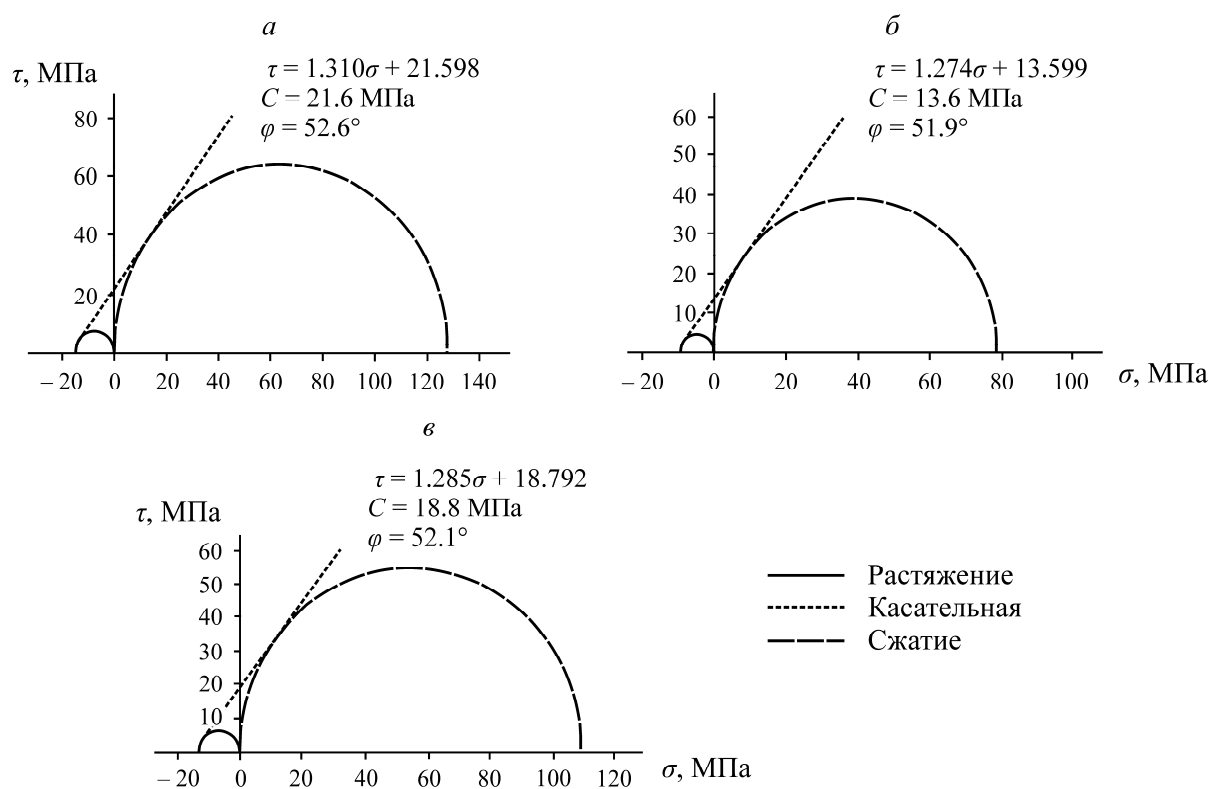


Рис. 2. Паспорт прочности роговика (гор. – 1350 м): а — естественное состояние; б — водонасыщенное; в — высушенное после водонасыщения

На рис. 3 приведены сравнительные данные по деформационно-прочностным характеристикам горных пород и руды для разных типов испытаний и состояний водонасыщения. В водонасыщенном состоянии происходит некоторое уменьшение пределов прочности при сжатии и растяжении, а также модулей упругости, коэффициентов сцепления и углов внутреннего трения относительно аналогичных параметров для пород и руды в естественном состоянии, а затем последующее их увеличение для высушенных после водонасыщения образцов. Значения деформационно-прочностных характеристик ниже, чем в естественном состоянии. Наименьшие колебания значений этих параметров наблюдаются для руды. Коэффициент Пуассона увеличивается в водонасыщенном состоянии и уменьшается для высушенных пород, однако его значения не превышают аналогичные для горных пород в естественном состоянии. Для руды он увеличивается при водонасыщении и дальнейшем высушивании.

Изменение коэффициентов сцепления и углов внутреннего трения, полученных по результатам сжатия и растяжения происходит следующим образом. В водонасыщенном состоянии коэффициенты сцепления и углы внутреннего трения незначительно уменьшаются относительно естественного состояния, затем наблюдается их увеличение для высушенных после водонасыщения пород и руды. Однако значения их меньше, чем в исходном состоянии. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями, посвященными изучению оценки влияния водонасыщения на механические свойства различных горных пород [9 – 14].

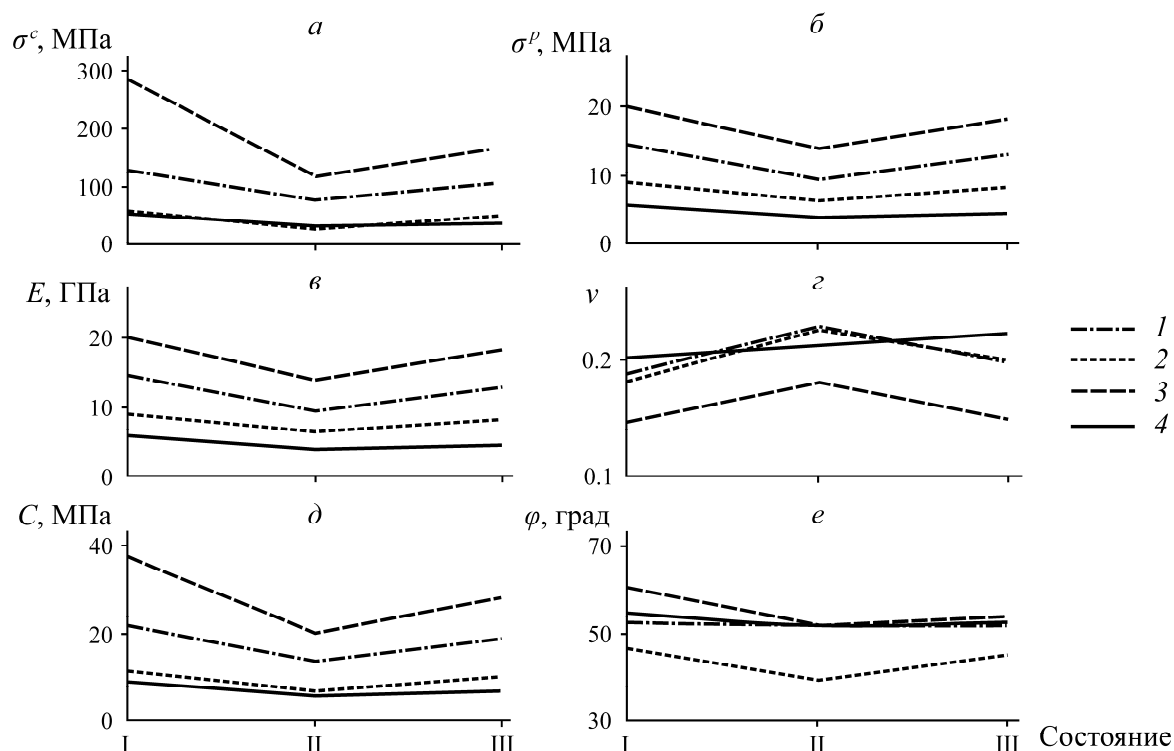


Рис. 3. Сравнение деформационно-прочностных характеристик горных пород и руды: пределы прочности при одноосном сжатии (а) и растяжении (б); модули упругости (в); коэффициенты Пуассона (г); сцепление (д) и угол внутреннего трения (е): I — естественное; II — водонасыщенное; III — высушенное после водонасыщения; 1, 2 — роговик с гор. 1350 м и 1418 м; 3 — габбро-долерит; 4 — руда

В табл. 5 приведены отношения деформационно-прочностных характеристик роговика, габбро-долерита и руды водонасыщенных образцов и высушенных после водонасыщения к соответствующим характеристикам в естественном состоянии при сжатии и растяжении.

ТАБЛИЦА 5. Отношения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении, модулей упругости, коэффициентов Пуассона, а также коэффициентов сцепления и углов внутреннего трения, построенных по испытаниям при одноосном сжатии и растяжении в водонасыщенных образцах и высушенных после водонасыщения к соответствующим характеристикам в естественном состоянии

Образец	Состояние	σ_i^c / σ_1^c	E_i / E_1	ν_i / ν_1	σ_i^p / σ_1^p	C_i / C_1	φ_i / φ_1
Роговик, гор. – 1350 м	Естественное	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Водонасыщенное	0.62	0.38	1.22	0.64	0.63	0.99
	Высушенное	0.86	0.93	1.05	0.88	0.87	0.99
Роговик, гор. – 1418 м	Естественное	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Водонасыщенное	0.50	0.19	1.25	0.71	0.59	0.84
	Высушенное	0.87	0.94	1.10	0.92	0.89	0.97
Габбро-долерит	Естественное	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Водонасыщенное	0.41	0.58	1.22	0.70	0.53	0.86
	Высушенное	0.59	0.79	1.01	0.91	0.73	0.89
Богатая сульфидная руда	Естественное	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Водонасыщенное	0.58	0.41	1.04	0.68	0.63	0.95
	Высушенное	0.72	0.45	1.10	0.81	0.76	0.97

ВЫВОДЫ

Петрографическое исследование горных пород Октябрьского месторождения в поле рудника “Таймырский”, подвергшихся затоплению, не выявило различия образцов до и после затопления. Определен элементный состав образцов роговика, габбро-долерита и халькопирит-пирротиновой руды. Различия весового содержания одинаковых химических элементов образцов до и после затопления незначительны. Определены деформационно-прочностные характеристики образцов горных пород и руды в естественном состоянии, водонасыщенных образцов и высушенных после водонасыщения при сжатии и растяжении. При испытаниях на сжатие и растяжение образцов в водонасыщенном состоянии пределы прочности, коэффициенты сцепления и углы внутреннего трения уменьшались относительно аналогичных характеристик образцов, испытанных в естественном состоянии; при испытаниях образцов, высушенных после водонасыщения, эти характеристики увеличивались, но были меньше их значений при испытаниях в естественном состоянии породы. Для модулей упругости при сжатии наблюдался такой же тренд изменения их значений. Коэффициенты Пуассона увеличивались при водонасыщении образцов и несколько уменьшались после высушивания породы.

Проведенная оценка физико-механических свойств горных пород и руды до и после затопления будет использована для выбора крепей и параметров технологических камер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звездкин В. А., Зуев Б. Ю., Климкина В. М., Анохин А. Г., Дарбинян Т. П. Исследование напряженно-деформированного состояния почвы разделительных массивов глубоких рудников Талнаха // Зап. Горн. ин-та. — 2010. — Т. 185. — С. 81–84.
2. Усков В. А., Еременко А. А., Дарбинян Т. П., Марысюк В. П. Оценка геодинамической опасности тектонических структур для подземной разработки Северных залежей Октябрьского месторождения // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 86–96.
3. **Руководство** по методике исследования физико-механических свойств и напряженного состояния горных пород при инженерных изысканиях в горных выработках, предназначенных для размещения объектов народного хозяйства. — М.: Стройиздат, 1977. — 24 с.
4. **ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009.** Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 35 – 2009 от 11.07.2009).
5. **ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии, 1984.
6. **ГОСТ 28985-91.** Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии, 1991.
7. **ГОСТ 21153.3-85.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении, 1985.
8. **ГОСТ 21153.5-88.** Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием, 1988.
9. Wasantha P. P. and Ranjith P. G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime, Eng. Geol., 2014, Vol. 178. — P. 91–101.

- 10. Cherblanc F., Berthonneau J., Bromblet P., and Huon V.** Influence of water content on the mechanical behavior of limesonte: role of clay minerals content, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2016, Vol. 49. — P. 2033–2042.
- 11. Hua W., Dong S., Li Y., and Wang Q.** Effect of cyclic wetting and drying on the pure mode II fracture toughness of sandstone, *J. Eng. Fracture Mechanics*, 2016, Vol. 153. — P. 143–150.
- 12. Wong L., Maruvanchery V., and Liu G.** Water effects on rock strength and stiffness degradation, *Acta Geotechnica*, 2016, Vol. 11. — P. 713–737.
- 13. Zhao Z., Yang J., Zhang D., and Peng H.** Effects of wetting and cyclic wetting–drying on tensile strength of sandstone with a low clay mineral content, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2017, Vol. 50. — P. 485–491.
- 14. Qiao L., Wang Z., and Huang A.** Alteration of mesoscopic properties and mechanical behavior of sandstone due to hydro–physical and hydro–chemical effects, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2017, Vol. 50. — P. 255–267.

Поступила в редакцию 13/IV 2023

После доработки 05/IX 2023

Принята к публикации 15/IX 2023