

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271

ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА СОСТОЯНИЕ МАССИВА И КРЕПИ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ РУДНИКА “ТАЙМЫРСКИЙ”

А. А. Еременко¹, Ю. Н. Шапошник¹, В. Н. Филиппов¹, Т. П. Дарбинян²

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: shaposhnikyury@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”, E-mail: DarbinyanTP@npr.nornik.ru, г. Норильск, Россия

В результате обследования горных выработок рудника “Таймырский” на ранее затопленных участках выявлена повышенная трещиноватость массива горных пород, вывалы пород из кровли и бортов в выработку, формирование куполов в кровле выработок и разрушение набрызгбетонной крепи. Основная причина обрушения — растворение рыхлого материала в трещинах массива габбро-долеритов и последующее его вымывание. Выявлены сложные условия залегания рудных залежей Октябрьского месторождения в пределах шахтного поля рудника “Таймырский”. Отработка запасов руд значительно осложнена тектонической нарушенностью, сильной трещиноватостью, слабой устойчивостью пород, проявлениями динамических форм горного давления. Проанализировано состояние горных выработок и проведены испытания образцов пород, отобранных в зоне подтопления: при одноосном сжатии определены пределы прочности, модули деформации и коэффициенты поперечной деформации образцов; при растяжении установлены пределы прочности; построены паспорта прочности (сцепление и угол внутреннего трения) горных пород. Дана оценка устойчивости массива горных пород Октябрьского месторождения, в том числе трещиноватости вмещающих пород. Проведено видеоэндоскопическое обследование разведочных и разгрузочных скважин с целью выявления мест расслоений и трещиноватости в обводненных зонах породного массива. Выполнено георадиолокационное изучение прибортового массива горных пород. Обнаружено корродирующее воздействие шахтной воды и рудничной атмосферы на металлические и бетонные элементы крепей. Предложены направления совершенствования технологии крепления горных выработок на обводненных участках месторождения. Даны рекомендации по обеспечению безопасности ведения горнопроходческих работ.

Месторождение, массив горных пород, выработка, крепь, трещиноватость, безопасность

DOI: 10.15372/FTPRPI20240609

EDN: RBCEWM

Отработка запасов Октябрьского месторождения на руднике “Таймырский” ведется на следующих объектах [1, 2]: запасы богатых руд западного и восточного флангов залежи Х-1(О); запасы богатых руд участка Большой Горст залежи Х-1(О); запасы богатых руд залежи С-2; запасы богатых руд залежей С-3; запасы богатых руд залежей С-3л; запасы богатых руд зале-

жей С-4. Надрудная толща горных пород Октябрьского месторождения представлена габбро-долеритами, подрудная толща — роговиками. В зависимости от мощности рудных тел в кровле очистных выработок залегают габбро-долериты или сульфидная руда.

Сульфидная руда — пирротин-халькопиритового состава, мелко-среднезернистая, массивная, плотная, с включениями силикатного материала и магнетита [3]. Трещиноватость и нарушенность руды средняя, ксенолитов, роговиков и габбро-долеритов — сильная. Установлено, что трещины перечисленных руд и пород заполнены серпентин-хлорит-ангидритовым материалом. Тектонические нарушения I–III порядков выполнены рудно-породной брекчией. Обломочный материал размером 0.05–0.20 м представлен сульфидной рудой, роговиком и габбро-долеритом. Трещиноватость и нарушенность весьма сильная. Трещины разнонаправленные, открытого и закрытого типа. Стенки трещин ровные, гладкие. По стенкам трещин развиваются ослабляющие минералы, хлорит, серпентин, ангидрит. Отдельность плитчатая.

В феврале 2021 г. во время горнопроходческих работ на руднике “Октябрьский” произошел прорыв воды с водоносного слоя на гор. – 350 м. Вследствие этого происшествия на руднике “Октябрьский” затоплены горные выработки на гор. – 906, – 957, – 1000, – 1048 м, на руднике “Таймырский” — на гор. – 1050, – 1100, – 1300, – 1400, – 1500 м. Постепенная откачка воды из выработок осуществлялась два месяца. Отработка рудных залежей на Талнахском месторождении напрямую не осложнена водопритоками грунтовых вод и вод водоносных горизонтов. До глубин 300 м от дневной поверхности водоносные зоны, как правило, взаимосвязаны друг с другом. Ниже 300 м такая связь практически отсутствует, только отдельные субвертикальные тектонические нарушения незначительно проницаемы, ниже гор. – 700 м породы практически безводны. Визуальными обследованиями горных выработок на ранее затопленных участках выявлено: повышенная трещиноватость массива горных пород; вывалы пород с кровли и бортов в выработку; формирование куполов в кровле выработок; разрушение набрызгбетонной крепи; достаточно частые случаи обрыва анкеров и единичные случаи срыва опорных плиток с анкеров; в местах, где происходили отслоения кровли, практически всегда имеются оборванные анкера, сохранившиеся анкера оголены на длину 0.5–0.8 м.

Специалистами ООО “Институт Гипроникель” совместно с работниками Центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета проведено обследование горных выработок рудника “Таймырский” после подтопления. Основная причина обрушения — растворение рыхлого материала (хлорита, серпентинита) в трещинах массива габбро-долеритов и последующее его вымывание, в том числе по твердым трещинам [4]. Растворенный минерал в трещине снижает сцепление и угол внутреннего трения, приводя к потере устойчивости массива и понижению категории нарушенности как минимум на несколько пунктов. К примеру, массив, относящийся к категории IIIб, после водонасыщения переходит в категорию IVб [4] — в таких массивах невозможно обеспечить устойчивость горных выработок штатной усиленной комбинированной крепью. Необходимо применение жестких видов крепи (монолитный железобетон или армированные арки RRS с высокой несущей способностью).

Ввиду длительного нахождения выработок в затопленном состоянии прогнозируется проявление негативных последствий для текущего состояния массива и крепей, проявляющиеся в следующих формах:

- изменение деформационно-прочностных свойств пород при водонасыщении (снижение сцепления и угла внутреннего трения), приводящих к снижению устойчивости выработок;
- динамическое воздействие водопородных масс на элементы крепей и контуры выработок;
- корродирующее воздействие воды и рудничной атмосферы на металлические и бетонные элементы крепей;

— развитие окислительных процессов, особенно при наличии сульфидсодержащих шламовых масс в тупиковых выработках.

Цель настоящей работы — оценка состояния массива и крепи горных выработок рудника “Таймырский” после длительного нахождения их в затопленном состоянии, а также разработка рекомендаций по приведению данных выработок в безопасное состояние и по эффективному производству горных работ.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЗАТОПЛЕННОГО МАССИВА ПОРОД ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Испытания механических свойств штучных образцов и керна горных пород Октябрьского месторождения, подвергшихся затоплению, проводились в Центре коллективного пользования геомеханических, геофизических и геодинамических измерений ИГД СО РАН. Порода испытывалась в естественном, водонасыщенном и высушенном после водонасыщения состояниях (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Деформационно-прочностные свойства руд и вмещающих пород Октябрьского месторождения в естественном, водонасыщенном и высушенном после водонасыщения состояниях

Порода	Состояние	Предел прочности на сжатие, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности на растяжение, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
1	a	127.8	31.406	0.189	14.6	21.6	52.6
	b	78.7	11.962	0.230	9.4	13.6	51.9
	c	109.5	29.058	0.199	12.9	18.8	52.1
2	a	56.3	13.523	0.182	9.0	11.3	46.4
	b	28.3	2.533	0.227	6.4	6.7	39.1
	c	48.7	12.745	0.201	8.3	10.1	45.1
3	a	122.7	25.512	0.176	7.1	14.8	62.9
	b	27.9	6.928	0.243	4.8	5.8	44.9
	c	59.0	10.883	0.202	5.1	8.7	57.2
4	a	285.0	50.475	0.148	19.9	37.7	60.4
	b	115.6	29.168	0.181	13.9	20.0	51.8
	c	169.2	39.849	0.150	18.1	27.7	53.8
5	a	55.8	26.712	0.203	5.7	8.9	54.6
	b	32.5	10.939	0.212	3.9	5.6	51.8
	c	40.4	12.115	0.224	4.6	6.8	52.7
6	a	92.3	42.319	0.183	7.5	13.2	58.2
	b	55.1	14.801	0.198	—	—	—
7	a	179.4	72.387	0.182	25.3	33.7	48.8
	b	146.6	46.384	0.211	—	—	—
8	a	58.4	31.464	0.234	14.9	14.7	36.4
9	a	54.3	19.666	0.134	6.6	9.5	51.6
10	a	298.0	169.938	0.144	19.0	37.6	61.7
	b	117.9	72.705	0.185	11.2	18.2	55.7
	c	222.5	172.143	0.158	15.4	29.3	60.5
11	a	52.5	16.326	0.155	5.0	8.1	55.7

Примечание: 1 — роговик, гор. – 1350 м; 2 — роговик, гор. – 1418 м; 3 — роговик, гор. – 1350 м; 4 — габбро-долерит; 5 — богатая сульфидная руда; 6 — богатая сульфидная руда, отм. 80 м; 7 — богатая сульфидная руда, отм. 85.1–86.1 м; 8 — лейка-габбро, отм. 77 м; 9 — габбро измененный; 10 — габбро пикритовый, отм. 48.0, 51.2, 52.7 м; 11 — габбро-долерит оливиновый, отм. 42.4 м; а — естественное состояние, b — водонасыщенное; c — высушенное после водонасыщения.

Согласно данным табл. 1, сцепление пород при водонасыщении значительно снижается: для роговиков на 37.0–60.8 %; габбро-долеритов — на 46.9 %. Также уменьшается угол внутреннего трения: для роговиков на 1.3–28.6 %; габбро-долеритов — на 14.2 %.

На основе лабораторных испытаний деформационно-прочностных свойств пород центральной части Октябрьского месторождения в поле рудника “Таймырский” установлено влияние водонасыщения руд и вмещающих пород на их прочностные свойства. Снижение прочности пород на одноосное сжатие при водонасыщенном и высушенном после водонасыщения состояниях составляет: для роговиков — 77.6 и 14.4 %; для габбро-долеритов — 59.4 и 40.6 %; для богатой сульфидной руды — 41.7 и 27.6 %. Естественная влажность роговиков, габбро-долеритов и богатой сульфидной руды — 0.26, 0.09 и 0.10 % соответственно. Среднее водопоглощение по массе роговиков, габбро-долеритов и богатой сульфидной руды — 0.96, 0.15 и 0.28 % соответственно. После 30 сут равновесная сорбционная влажность роговиков, габбро-долеритов и богатой сульфидной руды — 0.97, 0.22 и 0.33 % соответственно.

В марте 2023 г. сотрудниками ИГД СО РАН на руднике “Таймырский” обследовано состояние выработок на ранее затопленных участках 1, 8 (шахта 2, Центральная залежь X-10(О) и 10 (шахта 2, залежь С-4). Съёмка трещиноватости массива в горных выработках “Таймырского” рудника выполнялась линейным методом массовых замеров (ScanlineMapping). Горным компасом измерены углы и азимут падения трещин (Dip & Dip Direction). Обработка результатов съёмки проводилась с помощью программы Dips компании RocScience (Канада). Сводные элементы залегания выявленных систем трещин на участках 1, 8 и 10 по 23 замерам представлены в табл. 2. Азимут падения одной из основных трещин на участке 10 составлял ~340° на северо-восток, что практически соответствует азимуту падения трещин, отмеченному геологической службой рудника “Таймырский” в залежи СО-3.

ТАБЛИЦА 2. Сводные элементы залегания выявленных систем трещин на участках 1, 8 и 10 рудника “Таймырский”, град

Участок	Угол падения			Азимут падения		
	от	до	средний	от	до	средний
1, 8	80	80	80	350	180	359
	70	80	78	250	260	256
	30	50	39	335	355	341
10	60	80	73	255	275	265
	65	85	71	320	340	328
	60	80	72	220	240	233

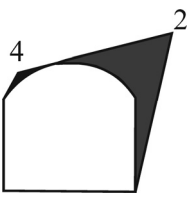
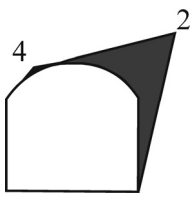
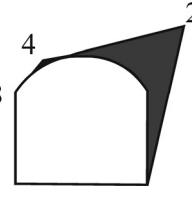
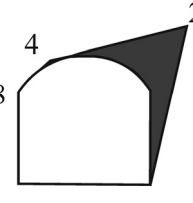
Применение того или иного программного обеспечения для моделирования устойчивости массива горных пород зависит от горных условий и механизмов вывалов. При вывалах блоков пород по трещинам используется программа Unwedge [5, 6]. Кинематический анализ выполнен с помощью средних ориентаций систем трещин. По результатам моделирования в программе Unwedge устанавливаются критические направления согласно существующим системам трещин, по которым образуются максимальные клинья, т. е. проходка в данных азимутах будет сопровождаться риском больших клиновидных обрушений [7]. Далее устанавливаются наиболее опасные направления проходки выработок по условию вывалообразования при определенной комбинации систем трещин.

При анализе учитывались следующие допущения для создания клиньев:

- нарушения сплошности продолжительные, предположительно смещения происходят в нарушениях сплошности и вызваны гравитацией, а не давлением;
- клинья по природе тетраэдрические, определяются тремя пересекающимися нарушениями сплошности. Одновременно анализируются максимум три структурные плоскости, если определено более трех крупных плоскостей, то рассматриваются все их комбинации;
- все поверхности нарушений сплошности в массиве идеально плоские;
- поверхности нарушений сплошности продолжительные, проходят через исследуемую область;
- нарушения сплошности повсеместны и могут встретиться в любом месте в горном массиве;
- подземная горная выработка имеет одну и ту же конфигурацию вдоль своей оси;
- клинья подвергаются только гравитационной нагрузке. Действующее поле напряжений в породном массиве вокруг горной выработки не учитывается;
- в настоящем исследовании рассматривались только клинья максимального размера, которые могут образоваться вокруг горной выработки.

Выполнено моделирование для всех направлений горной выработки с шагом 10° с помощью программы Unwedge. Использовалось сечение горной выработки 4.5×4.5 м. К крупным системам трещин применялся угол трения трещины 30° , сцепление по ним принималось равным нулю. При анализе результатов моделирования определены потенциальные тетраэдрические клинья, которые могут образоваться в кровле, подошве и боковых стенках. Клинью с коэффициентом запаса устойчивости f_s ниже 1 считаются неустойчивыми и для них требуется дополнительное крепление. Из всех рассмотренных вариантов наибольший риск для ведения горных работ создают клинья в кровле. В табл. 3 представлены результаты кинематического анализа с учетом основных систем трещин для участков 1 и 8. Выявленные системы трещин для участка 10 не образуют вывалоопасных клиньев.

ТАБЛИЦА 3. Результаты кинематического анализа с учетом основных систем трещин

Конфигурация вывалов	Параметры вывалов	Конфигурация вывалов	Параметры вывалов
 0 – 180°	Система трещин 2: $f_s = 0.170$, объем 5.225 м^3 , вес 13 845 т, высота вершины 2.58 м, опорное давление 1.216 т/м^2 . Система трещин 4: $f_s = 0.010$, объем 0.043 м^3 , вес 0.113 т, высота вершины 0.29 м, опорное давление 0.305 т/м^2	 10 – 190°	Система трещин 2: $f_s = 0.170$, объем 4.414 м^3 , вес 11 697 т, высота вершины 2.60 м, опорное давление 1.202 т/м^2 . Система трещин 4: $f_s = 0.010$, объем 0.016 м^3 , вес 0.043 т, высота вершины 0.20 м, опорное давление 0.194 т/м^2
 20 – 200°	Система трещин 2: $f_s = 0.170$, объем 4.095 м^3 , вес 10 852 т, высота вершины 2.61 м, опорное давление 1.194 т/м^2 . Система трещин 4: $f_s = 0.010$, объем 0.007 м^3 , вес 0.018 т, высота вершины 0.14 м, опорное давление 0.128 т/м^2	 30 – 210°	Система трещин 2: $f_s = 0.170$, объем 4.103 м^3 , вес 10 873 т, высота вершины 2.62 м, опорное давление 1.207 т/м^2 . Система трещин 4: $f_s = 0.010$, объем 0.003 м^3 , вес 0.008 т, высота вершины 0.09 м, опорное давление 0.087 т/м^2

С учетом обобщения выполненных ранее исследований можно заключить, что все неустойчивые клинья в кровле небольшого размера и веса, по большей части менее 10 т. Такие клинья легко крепятся сталеполимерными анкерными болтами, которые обычно могут нести нагрузку ~ 10 т и обеспечивают достаточно высокий коэффициент запаса устойчивости [8]. Результаты моделирования показали наличие некоторого количества клиньев небольшого размера (менее 0.3 м^3), которые могут развиваться и распространяться повсеместно, что потребует большого числа анкеров. При небольших клиньях в кровле рекомендуется местное использование анкеров либо с сеткой, либо с торкретбетоном толщиной более 3 см с фиброволокном (полимерным или стальным).

Установлены критические направления по существующим системам трещин, относительно которых образуются максимальные клинья, т. е. направления проходки в данных азимутах будут сопровождаться риском больших клиновидных обрушений. Оптимальные направления проходки выработки по условию минимизации нагрузки на крепь от возможных вывалов из кровли показаны на рис. 1. Расчет выполнен для основных систем трещин.



Рис. 1. Оптимальные направления проходки выработки по условию минимизации нагрузки на крепь

Результаты кинематического анализа вывалов следующие:

- наблюдается существенное различие устойчивости штреков, ориентированных по простиранию толщ пород, и ортов, пройденных вкрест простирания. Чем больше площадь поперечного сечения выработки (габариты), тем больше объем и высота вывалов;
- в существующих горнотехнических условиях отработки месторождения высота вывалов в горизонтальных выработках достигает 4 м, объем вывала — 9.5 м^3 , что следует учитывать при проектировании крепления;
- при проектировании горных работ следует избегать проходки выработок с $\sim 60-90^\circ$, так как при отклонении оси выработки от этого направления максимальная нагрузка на крепь от возможного вывала существенно снижается.

На основе визуального наблюдения и геометрических замеров трещиноватости массива в выработках оценивалась структурная нарушенность по методике Дира (RQD — индекс качества породы) [9–12]. Расчет значений F (количество трещин на 1 м) и RQD выполнялся по формуле Хадсона: $RQD = 100(0.1F + 1)\exp(-0.1F)$. Данные замеров RQD и F по выработкам на руднике “Таймырский” в 2023 г. приведены в табл. 4. На основании проведенных замеров трещиноватости массива в горных выработках рудника определено состояние породного массива. Среднее значение RQD на участке 10 горных работ составляет 75.5 % со среднеквадратичным отклонением 11.2 % и коэффициентом вариации 0.14, в том числе для роговиков 81.95, габбро-долеритов — 48.2, руды — 77.1 %. По показателю RQD массив руд и пород участка 10 относится к устойчивым.

ТАБЛИЦА 4. Результаты замеров RQD и F в ранее затопленных выработках на руднике “Таймырский”

Участок замеров	Выработка	Тип пород	F , шт./м	RQD, %
Шахта 2, участок 1 и 8, центральная залежь X-10(О)	Разведочный уклон 9-1	Роговик	6	87.9
			8	80.9
			9	77.2
			6	87.8
		Богатая сульфидная руда	11	77.6
			8	80.9
			7	84.4
			9	77.2
			8	80.9
			10	73.6
			7	84.4
			13	64.7
			9	77.2
			10	73.6
Шахта 2, участок 10, залежь С-4	Сопряжение доставочного уклона 1 с разведочным ортом запад-юг	Роговик	7	84.4
	Доставочный заезд 3-1	Роговик	10	73.6
	Соединительный орт 3	Габбро-долерит	18	48.2
	Разведочный орт 2-С из доставочного уклона 3	Богатая сульфидная руда	10	73.6

Если коэффициент вариации меньше 10 %, степень рассеивания данных считается незначительной, 10–20 % — средней, 20–33 % — значительной; если коэффициент вариации не превышает 33 %, то совокупность является однородной, если $>33\%$ — неоднородной [13]. В рассматриваемом случае коэффициент вариации, равный 14 %, свидетельствует о среднем рассеивании данных и соответствии нормальному закону распределения.

На участках 8 и 10 по роговикам трещины определены как волнистые, шероховатые шириной до 0.5 см, присутствует небольшой капеж. Такие же характеристики имеют трещины в сульфидной руде. По габбро-долеритам трещины волнистые, шероховатые шириной до 1.5–2.0 см, присутствует небольшой капеж.

По проведенным шахтным замерам можно сделать вывод о низкой устойчивости габбро-долеритов. Заполнитель трещин габбро-долеритов — менее прочный хлорит, серпентин, ангидрит. При таком заполнителе происходит частое обрушение пород в выработку. В роговиках заполнитель трещин — более прочный ангидрит, цеолит и кальций.

В результате замеров в горных выработках рудника “Таймырский” и расчетов выявлены значения Q -рейтинга: для роговиков — 2.40; для габбро-долеритов — 0.52; для сплошных сульфидных руд — 1.33. Категория горного массива по Q -рейтингу на отм. –1500 м при $Q=0.52–2.40$ — от очень слабого (категория E) до слабого (категории D), категории устойчивости — от V до IV (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Классификация массива горных пород по устойчивости с применением Q -рейтинга

Категория горного массива по Q -рейтингу	Q -рейтинг	Степень устойчивости горного массива	Категория
G	0.001–0.010	Исключительно слабый	V
F	0.01–0.10	Весьма слабый	
E	0.1–1.0	Очень слабый	
D	1–4	Слабый	IV
C	4–10	Средний	III

В соответствии с Q -индексом устанавливается категория нарушенности по [14, 15]. Массив, сложенный габбро-долеритами, относится к категории IIIб (очень нарушенный), роговиками — к категории IIIа (нарушенный), богатыми сульфидными рудами — к категории IIIа (нарушенный).

С целью выявления зон расслоений и трещиноватости, находящихся в обводненных зонах породного массива, проведено видеоэндоскопическое обследование разведочных и разгрузочных скважин. Показатель качества породы в зависимости от модуля трещиноватости по разгрузочным скважинам составил около 15 трещин на 1 м до глубины скважин 7–10 м, что соответствует средней трещиноватости массива. Рудный массив подвержен повышенному трещинообразованию, в том числе и из-за вымывания заполнителя трещин до глубины ~ 7 м, повышенная концентрация трещин зафиксирована на участке 5–7 м. Средние модули трещиноватости для поперечных трещин составили 2.5 м^{-1} , для продольных — 5.3 м^{-1} . По средним модулям трещиноватости породы относятся к категории IV (сильно трещиноватые).

Согласно выполненным расчетам сульфидные руды относятся к сильной и весьма сильной нарушенности на расстоянии от ранее затопленной выработки 2.5 м ($RQD = 34.3$ — сильнотрещиноватые), к слабой и средней нарушенности на расстоянии от ранее затопленной выработки 8.0 м ($RQD = 40.0$ — среднетрещиноватые). Габбро-долериты с определенными допущениями можно отнести к сильной нарушенности на расстоянии от ранее затопленной выработки 14 м ($RQD = 55.0$ — сильнотрещиноватые), к слабой и средней нарушенности на расстоянии от ранее затопленной выработки 23 м ($RQD = 72.0$ — среднетрещиноватые).

Усредненные показатели нарушенности массива трещинами RQD по залежи С-3 Октябрьского месторождения после затопления представлены в табл. 6. Четко прослеживается зависимость показателя нарушенности массива от расстояния до обводненной выработки. Для сульфидной руды влияние обводненности массива на устойчивость выработок оценивается в пределах 25–35 м. Практически такая же зависимость влияния водонасыщения на устойчивость массива присутствует для скарна полевошпатового, габбро-долерита, лейкогаббро, габбро-долерита пикритового, габбро-долерита оливинового, где верхняя граница водонасыщения массива достигает более 45 м.

ТАБЛИЦА 6. Усредненные показатели нарушенности массива трещинами RQD по залежи С-3

Порода	RQD (%) согласно расстоянию от ранее обводненной выработки (м)				
	2.5	8.0	14.0	23.0	26.0
Сульфидная руда	34.3	38.2	35.7	40.0	75.0
Габбро-долерит	34.2	50.0	55.0	72.0	62.0

В горных выработках рудника “Таймырский” проведено георадиолокационное обследование прибортового массива горных пород георадаром ОКО. Для повышения точности сканирования применялась методика исследований, в которой сканирование проводится во взаимно перпендикулярных направлениях по простиранию и вкрест простирания выработок.

Метод георадиолокации позволяет определять наличие пустот и водонасыщенных участков на подлежащих обследованию прибортовом массиве горных пород и закрепного пространства для обоснованного выбора крепления (перекрепления) массива, в том числе после затопления [16, 17]. На основе детального анализа полученных радарограмм сделаны следующие выводы:

- при обследовании обводненного массива уменьшается контрастность границ слоев и происходит размытие зондирующего сигнала, отраженного от границ слоев;
- при продольной ориентации антенного блока относительно направления его перемещения более детально картируются сосредоточенные неоднородности (линейные размеры которых сопоставимы или меньше длины волны зондирующего сигнала в среде); при поперечной ориентации антенного блока более детально и наглядно картируются протяженные неоднородности (линейные размеры много больше длины волны), например границы раздела слоев с различными электрофизическими свойствами.

Для оперативного обнаружения обводненных участков массива и нарушений массива и закрепного пространства на основе результатов георадиолокационного обследования рекомендуется:

- провести первичное обследование горной выработки после откачки воды и определить примерные границы и глубину залегания нарушений;
- проводить георадиолокационное обследование нарушения, перемещаясь вдоль направления его залегания и размещая антенный блок непосредственно над нарушением, при продольной ориентации антенного блока;
- отслеживать на дисплее прибора появление осей синфазности, соответствующих отражению зондирующего сигнала от участков массива с увеличенной влажностью радарограмм, подобных волновым картинам.

При выполнении работ выявлено корродирующее воздействие шахтной воды и рудничной атмосферы на металлические и бетонные элементы крепей. Определение фактического коррозионного износа стальных элементов крепления выработок необходимо для контроля их технического состояния и предотвращения возможных аварий.

На вентиляционно-транспортном уклоне гор. – 1418 м проведен отбор проб шахтной воды: проба 1 — шахтная вода с наличием осадка; проба 2 — прозрачная шахтная вода. Как известно, по отношению к бетону вода может быть стабильной (не выделяется и не растворяется карбонат кальция), нестабильной (из воды выделяется карбонат кальция в виде осадка), агрессивной (карбонаты и гидроксиды кальция бетона растворяются, переходя в растворимые гидрокарбонаты, при этом щелочность и pH воды увеличиваются). Отношение воды к одному из типов определяется индексом стабильности (индекс Ланжелье J): $J = -0.3 \div 0.3$ — вода стабильная; $J > 0.3$ — нестабильная; $J < -0.3$ — агрессивная по отношению к цементу [18].

Химический анализ проб шахтной воды, определенный в лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии ИГД СО РАН, представлен в табл. 7. Вода в пробах 1 и 2 близка по общему солесодержанию и составу. Вода в пробе 1 имеет индекс стабильности $J = 0.33$ (практически стабильна и не может вызывать коррозию бетона), в пробе 2 — $J = -1.15$ (агрессивна по отношению к калийсодержащим материалам и вызывает их коррозию).

ТАБЛИЦА 7. Химический анализ проб шахтной воды

Проба	Температура, °C	pH	Общее солесодержание, мг/л	Содержание кальция, мг/л	Щелочность общая, мг·экв/л	Индекс Ланжелье
1	21	7.15	5290	705	3.0	0.33
2	21	5.78	5350	665	2.5	-1.15

Для исследования растворимости горных пород в качестве агрессивной воды использовалась вода со следующими показателями: температура – 21 °C, pH 5.78, общее солесодержание — 5350 мг/л, содержание Са — 665 мг/л, общая щелочность — 2.5 мг·экв/л, индекс стабильности Ланжелье — 1.15. Изучались породы: роговик, богатая сульфидная руда, габбро-

долерит оливиновый, известняк. Образцы измельчались на вибромельнице Fritsch. Затем фракция – 0.315 мм в количестве 10 г помещалась в стакан и заливалась агрессивной водой объемом 300 мл. Полученная пульпа активировалась на магнитной мешалке. Первая проба бралась через 3 ч активации, вторая — через 2 сут после отстаивания. Пробы анализировались на содержание кальция. Результаты приведены в табл. 8.

ТАБЛИЦА 8. Содержание кальция в пульпе, мг/л

Время	Содержание кальция			
	Известняк	Роговик	Богатая сульфидная руда	Габбро-долерит
Через 3 ч	665	721	710	704
Через 2 сут	811	1092	962	922

После отстаивания рН воды во всех пробах повышался до 8.2–8.4. Вода теряла свою агрессивность и становилась нейтральной по отношению к горным породам. По степени и скорости растворения кальция в представленной агрессивной воде породы можно выстроить в следующий ряд: роговик — богатая сульфидная руда — габбро-долерит оливиновый — известняк.

Потеря массы металла металлических элементов крепи при сплошной коррозии на единицу площади поверхности рассчитывалась по формуле $\Delta m = (m_o - m_1) / S$ (m_o, m_1 — масса образца до и после испытаний, а также удаления продуктов коррозии, S — площадь поверхности образца). Площади поверхностей определялись с помощью лазерного 3D-сканера Rangevision PRO 5M с шагом сканирования 1 мм. Изменение размеров элемента по потере массы с учетом геометрии образца, например изменение толщины плоского образца вычислялось как $\Delta L = \Delta m / \rho$ (Δm — потеря массы на единицу площади, ρ — плотность металла). Плотность стали, из которой изготовлены элементы конструкций, принята $\rho = 7800$ кг/м³. Время нахождения элементов конструкций в водной среде или атмосфере повышенной влажности составляло ~3 мес. Скорость коррозии за год рассчитывалась по формуле $V = (\Delta L / t) 12$, где t — время нахождения элементов крепи под водой. В табл. 9 приведены показатели коррозии элементов крепи, а также соответствие рассчитанных показателей коррозии группе стойкости и баллу согласно шкале коррозионной стойкости металлов.

ТАБЛИЦА 9. Показатели коррозии элементов крепи, а также их соответствие группе стойкости и баллу по ГОСТ 13819-68

Показатель	Клин затопленный	Клин незатопленный	Пластина	Арматура
Площадь поверхности, м ² с одной стороны s с двух сторон $S = 2s$	0.016 0.033	0.013 0.026	0.022 0.045	Осмотр аншлифа под микроскопом
Масса, кг до испытаний m_o после испытаний m_1	0.619 0.614	0.732 0.731	0.795 0.784	
Потеря массы металла на единицу площади Δm , кг	0.058	0.038	0.252	
Изменение размера по потере массы ΔL , мм	0.008	0.005	0.032	
Скорость коррозии металла в год V , мм/год	0.030	0.020	0.130	
Группа стойкости (ГОСТ 13819-68)	Стойкие	Стойкие	Понижено стойкие	Весьма стойкие
Балл (ГОСТ 13819-68)	4	4	6	2

Прочность набрызгбетона на растяжение определялась по ГОСТ 18105-86, прочности на одноосное сжатие — по ГОСТ 10180-2012. Размеры образцов для испытаний на сжатие составляли $100 \times 100 \times 100$ мм, при изгибе — $40 \times 40 \times 100$ мм. Перед испытанием образцы осматривались с целью выявления дефектов в виде трещин, сколов ребер, раковин и инородных включений. Образцы нагружались непрерывно с постоянной скоростью 0.1 мм/мин до их разрушения. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принималось за разрушающую нагрузку. Предел прочности при сжатии образца определялся как $R = \alpha(P / F)$, где P — наибольшая нагрузка, установленная при испытании, F — площадь поперечного сечения образца. В расчете принимался поправочный коэффициент α для образцов с размером ребра 100 мм, равный 0.95.

В испытаниях на растяжение при изгибе образец устанавливался в пресс и осуществлялось нагружение до разрушения. Предел прочности на растяжение при изгибе вычислялся как $R_{ib} = \delta(Fl / ab^2)$, где F — разрушающая нагрузка; l — расстояние между осями опор; a, b — ширина и высота поперечного сечения образца; $\delta = 0.92$ — масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к базовым размерам и формам образца.

Испытания проводились для набрызгбетона, находящегося в естественном, водонасыщенном и высушенном после водонасыщения состояниях (табл. 10).

ТАБЛИЦА 10. Пределы прочности образцов из набрызгбетона в возрасте 28 сут, МПа

Состояние	Предел прочности на сжатие	Предел прочности на растяжение
Естественное	27.2	3.8
Водонасыщенное	11.2	3.0
Высушенное после водонасыщения	15.1	3.5

Согласно нормативным документам, минимальное значение бетона по прочности на сжатие должно соответствовать классу В25, при котором средняя прочность на сжатие бетона в возрасте 28 сут должна составлять 32.06 МПа, рекомендуемая марка цемента — М400. По данным лабораторных испытаний необходимая прочность на сжатие бетона в возрасте 28 сут не достигается.

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КРЕПЛЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

В ходе проведения натурных исследований отмечено, что в некоторых случаях анкеры оголены на 0.2–0.6 м и опорные плиты не подтянуты вплотную к контуру выработки. Это вызвано разрушением приконтурного массива, при котором анкеры оголяются, теряя свое первоначальное натяжение и несущую способность. Для обеспечения устойчивости породного массива при сталеполимерном креплении необходимо формирование в проходческом забое грузонесущей балки из горных пород кровли и бортов. Целесообразно использовать анкеры с более высоким натяжным усилием из арматурной стали винтового профиля длиной 2.4 м, диаметром 22 мм и опорной планкой $150 \times 150 \times 4$ мм. Механизированную установку анкерной крепи рекомендуется проводить оборудованием Robolt, дающим возможность пневматического внедрения полноразмерных ампул в шпур под закрепленной кровлей выработки.

Сопряжения выработок, где их ширина составляет более 6 м, требуют применения анкеров большей длины, чем 2.4 м, такими являются канатные анкеры. Для практической реализации технологии крепления выработок канатными анкерами специалистам рудника “Таймырский” необходимо провести изменение конструкции существующих установок или выбрать новое оборудование.

Торкретбетон должен применяться с добавками (ускорителем схватывания, пластификатором и фиброй), что существенно повышает его прочностные характеристики и адгезию. Для условий обводненного массива рекомендуется применение комбинированной крепи с использованием армированных набрызгбетонных ребер RRS на основе армоферм, разработанных компанией “Тиссен Шахтбау ГМБХ” (Германия). Поддержание выработок в устойчивом состоянии может осуществляться формированием выдержанного свода. На руднике это должно достигаться применением контурного взрывания с уменьшенным зарядом взрывчатых веществ по кровле выработки. При проходке выработок с целью выявления пустот и сильнотрещиноватого массива целесообразно использовать георадары [19]. С 2022 г. на рудниках “Таймырский” и “Комсомольский” ПАО “ЗФ ГМК “Норильский никель” тестируется глубинный георадар ГРОТ-12, который позволяет получить данные о породах на глубинах до 50 м.

ВЫВОДЫ

На основе лабораторных испытаний деформационно-прочностных свойств пород центральной части Октябрьского месторождения в поле рудника “Таймырский” установлено влияние водонасыщения руд и вмещающих пород на их прочностные свойства. Снижение прочности пород на одноосное сжатие при водонасыщенном и высушенном после водонасыщения состояниях соответственно составляет: для роговиков — 77.6 и 14.4 %; для габбро-долеритов — 59.4 и 40.6 %; для богатой сульфидной руды — 41.7 и 27.6 %. Для роговиков, габбро-долеритов и богатой сульфидной руды определены следующие показатели: естественная влажность — соответственно 0.26, 0.09 и 0.10 %; среднее значение водопоглощения — 0.96, 0.15 и 0.28 % по массе; равновесная сорбционная влажность — 0.97, 0.22 и 0.33 % после 30 сут.

По средним значениям модуля трещиноватости сульфидные руды можно отнести к породам сильной и весьма сильной нарушенности на расстояниях до 2.5 м от контура ранее затопленной выработки ($RQD=34.3$ — сильнотрещиноватые), к слабой и средней нарушенности на расстоянии от контура ранее затопленной выработки 8.0 м ($RQD=40.0$ — среднетрещиноватые). Габбро-долериты можно отнести к породам сильной нарушенности на расстоянии от контура ранее затопленной выработки до 14 м ($RQD=55.0$ — сильнотрещиноватые), к слабой и средней нарушенности на расстоянии от ранее затопленной выработки до 23 м ($RQD=72.0$ — среднетрещиноватые). На основании проведенных расчетов значений RQD по разведочным скважинам для сульфидной руды влияние обводненности массива на устойчивость выработок оценивается в пределах 25–35 м.

Экспериментальными исследованиями показано, что методом георадиолокации можно определять наличие пустот и водонасыщенных участков для обоснованного выбора крепления (перекрепления) массива, в том числе и после затопления. Определены показатели коррозии элементов металлической крепи, установлено соответствие рассчитанных показателей коррозии группе коррозионной стойкости металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
2. Конурин А. И., Марысюк В. П. Оценка геомеханического состояния массива горных пород на Талнахском и Октябрьском месторождениях. Развитие физико-технических и физико-химических геотехнологий освоения месторождений полезных ископаемых, опасных по газо- и геодинамическим явлениям: в 3 т. Т. 1. — Новосибирск: СО РАН, 2023. — 19 с.

3. **Опарин В. Н.** Современное состояние, проблемы и стратегия развития горного производства на рудниках Норильска. — Новосибирск: СО РАН, 2008. — 371 с.
4. **Еременко А. А., Дарбинян Т. П., Шапошник Ю. Н., Усольцева О. М., Цой П. А.** Оценка физико-механических свойств руд и горных пород, подвергшихся затоплению // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 24–31.
5. **Макаров А. Б.** Практическая геомеханика. — М.: Горн. кн., 2006. — 391 с.
6. **Косырева М. А., Еременко В. А., Горбунова Н. Н., Терешин А. А.** Расчет параметров крепи выработок с использованием программы Unwedge на рудниках ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель” // ГИАБ. — 2019. — № 8. — С. 57–64.
7. **Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Бабкин Е. А.** Оценка состояния массива горных пород на рудниках ЗФ ОАО “ГМК “Норильский никель” // ГИАБ. — 2017. — № 1. — С. 5–17.
8. **Микулин Е. И., Минзарилов Р. Г.** Совершенствование параметров сталеполимерного анкерного крепления полевых выработок шахт СУБРа // Зап. Горн. ин-та. — Т. 156. — 2004. — С. 143–145.
9. **Deere D. U. and Deere D. W.** The rock quality designation (RQD) index in practice, Rock Classification Systems Eng. Purposes, ASTM STP 984, Am. Soc. Testing Materials, Philadelphia, 1988. — P. 91–101.
10. **Bieniawski Z. T.** Engineering rock mass classifications, New York, Wiley, 1989. — 251 p.
11. **Аксой С. О.** Системы классификации массивов горных пород: историческое развитие, области применения, ограничения // ФТПРПИ. — 2008. — № 1. — С. 56–68.
12. **Неверов С. А., Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Конурин А. И.** Об интеграции отечественных и зарубежных классификаций устойчивости массива пород для обоснования крепления горных выработок // Горн. журн. — 2022. — № 1. — С. 56–61.
13. **Кузнецов Н. Н.** К вопросу об определении количества опытов, надежности и точности результатов при изучении физико-механических свойств горных пород // Вестн. МурГТУ. — 2015. — Т. 18. — № 2. — С. 183–191.
14. **Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Марысюк В. П., Наговицин Ю. Н.** Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива горных пород // Горн. журн. — 2018. — № 10. — С. 101–106.
15. **Онуприенко В. С., Еременко А. А., Шапошник Ю. Н., Копытов А. И.** Выбор типов и параметров крепей в условиях подземной отработки апатит-нефелиновых месторождений // Вестн. КузГТУ. — № 2. — 2023. — С. 56–70.
16. **Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С.** Теория и методы георадиолокации. — М.: Горн. кн. — 2008. — 196 с.
17. **Изюмов С. В.** Совершенствование опережающего контроля массива горных пород радаром при проходке подземных горных выработок: дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2002. — 154 с.
18. **Рушников А. Ю.** О некоторых особенностях расчета индексов стабильности воды Ланжелье // Сантехника, отопление, кондиционирование. — 2017. — № 7. — С. 24–29.
19. **Еременко А. А., Дарбинян Т. П., Шапошник Ю. Н., Портола В. А., Цой П. А.** Определение степени окисляемости и самовозгорания руд и горных пород в естественном и водонасыщенном состояниях // ФТПРПИ. — 2023. — № 6. — С. 81–90.

Поступила в редакцию 03/VII 2024

После доработки 01/XI 2024

Принята к публикации 08/XI 2024