

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.831

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253>

Особенности изучения физико-механических свойств многолетнемерзлых массивов горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений

© А.Н. Авдеев^a, Е.Л. Сосновская^b, А.Ю. Болотнев^c, Батжаргал Долгорсүрэн^d

^{a,b}Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

^{c,d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключалась в изучении геомеханических условий рудных месторождений с оценкой прочностных и деформационных свойств массивов горных пород ряда рудных месторождений, залегающих в криолитозоне. Исследования проводились в 2000–2018 гг. на базе лаборатории геомеханики и физики горных пород Иркутского национального исследовательского технического университета. Основные физико-механические свойства горных пород и руд определялись в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации. Выбор исследуемых характеристик базировался на наиболее распространенных методах оценки геомеханических условий месторождений и расчетов напряженного-деформированного состояния в конструктивных элементах систем разработки. Анализ прочностных и деформационных характеристик горных пород осуществлялся с учетом основных структурных и криологических особенностей массивов горных пород рудных месторождений и их обнажений в горных выработках. По результатам исследований установлено, что при разработке рудных месторождений криолитозоны выделяются три типа геомеханических условий: зона постоянной мерзлоты, переходная зона мерзлых пород в талые и зона постоянно талых пород. При оценке геомеханических условий рудных месторождений прочностные и деформационные свойства горных пород предлагается определять дифференцированно: в естественно-сухом состоянии пород для зоны постоянной мерзлоты; пород в водонасыщенном состоянии после 25 циклов замораживания и оттаивания для переходной зоны; в естественно-сухом и водонасыщенном состоянии в зависимости от конкретных гидрогеологических условий для зоны постоянно талых пород. Переход от прочностных свойств горных пород в образцах к их свойствам в массиве предлагается осуществлять на основе дифференцированного коэффициента структурного ослабления с учетом факторов мерзлоты, трещиноватости и геометрических размеров обнажений горных выработок. Оценку потенциальной удароопасности массивов горных пород и склонности горных пород к хрупкому разрушению предлагается производить также с учетом их криогенного состояния. Склонность пород к хрупкому разрушению рекомендуется оценивать на основе базовых методик: по критериям Г.Н. Кузнецова, запредельного деформирования или комбинированными способами. По результатам исследований разработан ряд методических и нормативных документов по управлению горным давлением и определению параметров подземных геотехнологий для условий разработки рудных месторождений, расположенных в криолитозоне.

Ключевые слова: криолитозона, физико-механические свойства горных пород, геомеханические условия, потенциальная удароопасность, устойчивость горных выработок

Информация о статье: Дата поступления 17 января 2019 г.; дата принятия к печати 24 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю., Батжаргал Долгорсүрэн. Особенности изучения физико-механических свойств многолетнемерзлых массивов горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 240–253. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253.

Specifics of permafrost rock mass' physical-mechanical properties study in evaluation of ore deposit geotechnical conditions

© Arkady N. Avdeev^a, Elena L. Sosnovskaya^b, Alexander Yu. Bolotnev^c, Batjargal Dolgorsuren^d

^{a,b}Mining Institute, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

^{c,d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim has been to study the geotechnical conditions of certain ore deposits occurring in a permafrost zone, with the focus on the stress-strain properties of the rocks mass. The study was conducted in 2000-2018 at the Laboratory of Geomechanics and Rock Physics, INRTU. The main physical-mechanical properties of the rocks and ores have been defined in accordance with the requirements of the Russian Federation standards. The characteristics were selected based on the most common methods of estimating the geotechnical conditions of ore deposits, and on the stress-strain calculation for the structural components of the filed development systems. The analysis of the rock stress-strain characteristics has been carried out with the account of the main structural and cryogenic features of the ore deposit rock mass, and of rock outcrop in the mine workings. The study has distinguished three types of geotechnical conditions: permanent-frozen rock zone, frozen-to-thaw rock transition zone, and permanent-thaw rock zone. When evaluating the ore deposit geotechnical conditions, a differentiated approach to determining the rock stress-strain properties is suggested: natural dry state for the permanent-frozen rock zone; water-saturated state after 25 freezing-thawing cycles for the transition zone; natural dry and water-saturated state (depending on the hydrogeological factors) for the permanent-thaw rock zone. It is suggested that the conversion of the sample rock strength properties into those of the rock mass is done using the differentiated coefficient of structural slackening with the account of the permafrost, rock jointing, and the mining's' geometrics. When evaluating the burst risk and the brittle fracture susceptibility, the rock cryogenic state should be taken into account. It is recommended that the brittle fracture susceptibility is defined by either of the following methods: by the Kuznetsov criterion (the ratio of the rock's compressive strength to its tensile strength), by out-of-limit deformation (the ratio of the rock's modulus of elasticity to its modulus of decrease), or a by combination of the two. Based on the research results, a series of methodological and normative documents have been developed for regulating the rock pressure and defining the geotechnical parameters for the conditions of cryolithozone ore deposits underground mining.

Keywords: permafrost zone, physical-mechanical properties of rocks, geotechnical conditions, rock burst risk, stability of mine workings

Information about the article: Received January 17, 2019; accepted for publication May 24, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Bolotnev A.Yu., Batjargal Dolgorsuren. Specifics of permafrost rock mass' physical-mechanical properties study in evaluation of ore deposit geotechnical conditions. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 240–253. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253.

Введение

Горно-геологические условия разработки рудных месторождений Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока весьма разнообразны. Неравномерное распределение разрывных нарушений и трещиноватых участков пород, гравитационно-тектоническое природное напряженное состояние в массивах горных пород обуславливают крайне сложные условия отработки. Дополнительно осложняет ведение горных работ наличие повсеместно распространенного

мощного слоя многолетнемерзлых пород. Суммарная площадь, занятая многолетнемерзлыми породами, составляет более 50 % территории России. Глубина слоя многолетнемерзлых пород варьирует в широких пределах, достигая под водоразделами более 500 м (табл. 1).

Многолетнемерзлые породы неоднородны по температурному режиму, мощности, наличию льда, составу. Геокриологические условия на месторождениях существенно изменяются при вскрытии мерзлых толщ горными

Таблица 1

**Глубина залегания многолетнемерзлых пород
на некоторых золоторудных месторождениях**

Table 1

Permafrost depth at some gold fields

Месторождение	Глубина криолитозоны, м
Майское	190–320
Зун-Холбинское	200 и более
Ирокиндинское	200–350
Кедровское	250–300
Каральвеем	150–500
Коневинское	250–400
Ново-Широкинское	200 и более
Биркачан	200–250

выработками как при открытом, так и при подземном способе добычи. В пределах слоя многолетнемерзлых пород появляются локальные участки растепленных горных пород, вызванные нарушением теплового режима горного массива по технологическим причинам [1–7]. При понижении горных работ глубже криогенного слоя начинается переход мерзлых пород в талые. Геомеханические условия в этой области ухудшаются вследствие фазового перехода льда в воду, прочностные свойства массива горных пород снижаются, а деформационные растут. На нижних горизонтах рудных месторождений, расположенных в криолитозоне, по совокупности факторов возможны проявления горного давления и сдвижения в динамической форме. Распространенные методы прогноза динамических проявлений горного давления базируются на оценке прочностных и деформационных характеристик горных пород. Без корректного учета физико-механических свойств горных пород криогенных массивов месторождений невозможно надежно оценивать устойчивость горных выработок и целиков и своевременно прогнозировать и предотвращать проявления горного давления в динамических и статических формах.

Для оценки геомеханических условий рудных месторождений авторы

статьи анализировали прочностные и деформационные свойства массивов горных пород ряда рудных месторождений, залегающих в криолитозоне. Информация о криогенных условиях очень важна при оценке геомеханических условий разработки месторождений. Мерзлоту необходимо учитывать при инженерных расчетах конструктивных элементов систем разработки, параметров крепления и закладки выработанного пространства [1–10].

Материал и методы исследований

Исследования проводились в 2000–2018 гг. на базе лаборатории геомеханики и физики горных пород Иркутского национального исследовательского технического университета. Основные физико-механические свойства горных пород и руд определялись в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации к методам испытаний горных пород. Выбор исследуемых характеристик базировался на наиболее распространенных методах оценки геомеханических условий рудников и расчетов напряженного-деформированного состояния в конструктивных элементах систем разработки, в том числе авторских. Анализ прочностных и деформационных характеристик горных пород осуществлялся с учетом основных структурных и

криологических особенностей массивов горных пород рудных месторождений и их обнажений в горных выработках.

Результаты исследований

Из горной практики известно, что при инженерных расчетах устойчивости горных выработок как при открытом, так и при подземном способе добычи наиболее часто используются следующие основные физико-механические показатели: плотность, пределы прочности при одноосном сжатии, растяжении и срезе со сжатием, модуль Юнга, модуль деформации, коэффициент Пуассона, коэффициент крепости по М.М. Протодякову, сцепление и угол внутреннего трения.

В последние десятилетия при оценке техногенных напряжений в окрестности горных выработок и целиков большое распространение получили математические методы моделирования с применением компьютерных технологий: методы граничных сингулярных уравнений [11, 12] и конечноэлементного анализа [13, 14].

Сначала эти расчеты были трудоемкими, поэтому количество используемых физико-механических характеристик горных пород принималось минимальным для упрощения расчетов. Так, в программах ELAST и ELAST-2, разработанных в конце прошлого века в Институте горного дела СО РАН (доктор физико-математических наук В.И. Машуков), использовались две наиболее влияющие на геомеханическое состояние горных пород характеристики: модуль деформации и коэффициент Пуассона. Дополнительно при оценке первоначальных напряжений учитывалась средняя плотность массива горных пород. При усовершенствовании технологий в расчетах стало использоваться большее количество параметров. В программном комплексе FEM, разработанном в Институте горного дела УрО РАН (профессор О.В. Зотеев), при решении упругих задач

используется шесть начальных характеристик ненарушенных горных пород: модуль деформации, коэффициент Пуассона, плотность горных пород, угол внутреннего трения, сцепление, предел прочности на растяжение. Следует отметить, что при конечноэлементном моделировании широко используются разномодульные среды, то есть стало возможным одновременно учитывать физико-механические свойства разных литологических типов горных пород, руд и закладочных материалов.

Таким образом, определение прочностных и деформационных характеристик горных пород становится все более значимым при оценке напряженно-деформированного состояния массивов горных пород.

В процессе исследования геомеханических условий на рудниках при определении прочностных свойств возникает важная задача оценки склонности горных пород к хрупкому разрушению с целью прогноза потенциальной удароопасности массива (табл. 2).

В качестве базового критерия удароопасности широко используется критерий запредельного деформирования: отношение модуля упругости E к модулю спада M . При $E / M < 1$ порода считается потенциально удароопасной; при $E / M > 1$ – неудароопасной (рис. 1). Метод достаточно трудоемкий, поэтому для оперативной оценки удароопасности часто используется критерий Г.Н. Кузнецова.

По этой методике в качестве критерия хрупкого разрушения предложено использовать отношение предела прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ к пределу прочности на одноосное растяжение σ_p : $\sigma_{сж} / \sigma_p$. Установлено, что породы разрушаются хрупко, если $\sigma_{сж} / \sigma_p > 6$.

В качестве примера произведем оценку потенциальной удароопасности горных пород нижних горизонтов Зун-Холбинского месторождения (см. табл. 2).

Таблица 2

Основные физико-механические характеристики горных пород
нижних горизонтов Зун-Холбинского месторождения (данные 2017 г.)

Table 2

Main physical-mechanical characteristics of lower horizon rocks,
Zun-Kholbinskoe deposit (data of 2017)

Наименование породы	Известняки	Метапесчаники	Диориты	Гранодиориты
Средняя плотность ρ , г/см ³	2,7	2,7	2,8	2,8
Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	46,1	51,1	93,7	114,7
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	12,2	11,7	12,4	14,5
Сцепление τ , МПа	14,3	16,4	25,8	31,6
Угол внутреннего трения ϕ , град.	–	24	34	35
Коэффициент хрупкости $K_{хр}$	3,6	4,3	7,6	7,9
Коэффициент Пуассона μ	0,22	0,15	0,3	–
Коэффициент крепости по М.М. Протоdjяконову f	6	6	9	10
Модуль общей деформации E_d , МПа 10^4	3,42	3,98	6,2	4,99
Модуль упругости E , МПа 10^4	3,74	5,00	6,35	5,73
Модуль спада M , МПа 10^4	7,24	9,37	15,28	14,1
Критерий удароопасности	2,86	1,08	0,44	0,46
Суммарная оценка удароопасности	Неудароопасный	Удароопасный		

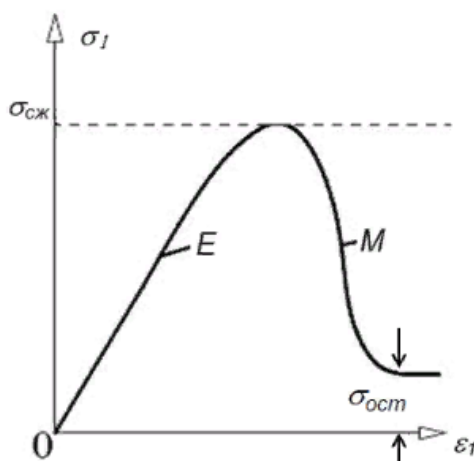


Рис. 1. Схема диаграммы «напряжение – деформация» при одноосном сжатии:

σ_1 – осевое давление на образец, МПа; ϵ_1 – продольная деформация образца;
 E – модуль упругости образца, МПа; M – модуль спада образца, МПа; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; $\sigma_{ост}$ – предел остаточной прочности, МПа

Fig. 1. Stress-strain diagram, uniaxial compression:

σ_1 – axial pressure, sample, MPa; ϵ_1 – longitudinal deformation, sample;
 E – modulus of elasticity, sample, MPa; M – modulus of decline, sample, MPa;
 $\sigma_{сж}$ – ultimate strength under uniaxial compression, MPa; $\sigma_{ост}$ – ultimate residual strength, MPa

Оценка хрупкости пород по критерию Г.Н. Кузнецова показала, что склонными к хрупкому разрушению под нагрузкой являются диориты и гранодиориты, несклонными – известняки и метапесчаники. Коэффициент хрупкости по Г.Н. Кузнецову изменяется в пределах от 2,7 до 8,4, составляя в среднем 5,8, что отвечает категории «неудароопасный». Оценка потенциальной удароопасности по критерию запредельного деформирования показала, что склонными к хрупкому разрушению под нагрузкой являются диориты и гранодиориты. Известняки и метапесчаники показали категорию «неудароопасный». В среднем по всем представленным образцам коэффициент удароопасности равен 0,47, это меньше критерия удароопасности $E/M = 1$, что отвечает характеристике массива «неудароопасный». Таким образом, оба метода показали хорошую сходимость и рекомендуются к использованию как комплексно, так и по отдельности – в зависимости от важности инженерно-геомеханических задач.

Следует учесть, что зачастую комплексные исследования прочностных и деформационных свойств затруднены вследствие недостаточно качественного и ограниченного количественно материала проб. Распространенный керновый материал разведочных скважин диаметром менее 42 мм не отвечает требованиям российских стандартов определения физико-механических свойств горных пород. При использовании кусков отбитой горной породы, отобранной на глубоких горизонтах рудников, прочностные свойства горных пород получаются существенно заниженными, так как вследствие частичного разрушения буровзрывными работами отбитая горная порода более трещиновата, чем в массиве. Для оптимальной оценки геомеханических условий необходимо использовать наименее разрушенный керновый материал разведочных скважин диаметром 50 мм и более.

При оценке физико-механических свойств горных пород криолитозоны следует учитывать криогенные факторы: фазовое состояние воды в породе, конфигурацию ледяных включений, прослоев, наличие залежей льда в породной массе, структуру и текстуру пород. Установлено, что криогенное состояние массива горных пород оказывает значительное влияние на прочностные свойства массива горных пород [1–10]. По деформационно-прочностным показателям мерзлые породы существенно отличаются от талых: прочностные показатели растут, а деформационные характеристики снижаются. Особое значение приобретает время приложения нагрузки: для льда, являющегося существенной частью многолетнемерзлого массива горных пород, характерны явления снижения прочности и возрастания деформаций при длительных нагрузках. Следует отметить, что значительное изменение прочностных свойств мерзлых пород может происходить как при оттаивании, так и при колебаниях температуры пород в диапазоне отрицательных величин.

Для оценки снижения прочностных свойств при их периодическом замораживании и оттаивании широкое распространение получил показатель морозостойкости, равный отношению пределов прочности при сжатии исходной породы к ее пределу прочности при сжатии после многократных циклов замораживания и оттаивания в лабораторных условиях. Например, для условий Зашихинского редкометалльного месторождения снижение прочностных свойств составило 5–12 % при 25 циклах замораживания-оттаивания (табл. 3). К сожалению, метод получил распространение в основном для оценки устойчивости бортов карьеров и возможности использования грунтов в строительстве. По мнению авторов, показатель морозостойкости перспективен при оценке прочностных характеристик горных пород в подземных горных

Таблица 3

**Снижение прочностных свойств пород при многократном
растеплении горных пород (на примере Зашихинского
редкометалльного месторождения)**

Table 3

**Decrease in strength properties of rocks for repeated-thawing
mine workings (Zashikhinskoye rare metal deposit)**

Наименование породы	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Предел прочности при одноосном сжатии после 25 циклов замораживания и оттаивания, МПа	Морозостойкость, %
Граниты среднезернистые	88,11	79,83	10
Метасоматиты	93,06	85,71	8
Метасоматиты альбит-кварцевые среднезернистые	84,46	73,25	12
Граниты рибекитовые	104,16	99,2	5
Диотиры	128,67	121,58	5

выработках переходных участков мерзлых пород в талые, особенно при их техногенном растеплении. Очевидно, что в случае техногенного растепления стенок горных выработок и целиков количество циклов замораживания-оттаивания возрастает многократно по отношению к сезонному оттаиванию открытых горных разработок.

В техногенных и природных переходных зонах мерзлых пород в талые значительное влияние на устойчивость горных выработок и целиков оказывает водопиток. Обводненность горных пород на локально растепленных участках усложняет геомеханические условия выемки рудных тел.

Так, для условий отработки Коневинского золоторудного месторождения анализ результатов определения физико-механических свойств пород в водонасыщенном состоянии позволяет отметить, что свойства значительно отличаются от полученных ранее для условий естественно-сухого состояния (табл. 4). Например, прочность пород на сжатие гранодиоритов для пород в естественно-

влажном состоянии составляет 98,1 МПа, в водонасыщенном состоянии – 76,6 МПа, на растяжение – 18 и 12,5 МПа соответственно. Сцепление беретизированных гранодиоритов равно: в естественно-влажном состоянии – 25,3 МПа, в водонасыщенном состоянии – 13,1 МПа. Таким образом, в водонасыщенном состоянии снижение прочностных характеристик горных пород может достигать 50 % и более.

В горной практике для оценки снижения прочности водонасыщенных скальных и полускальных пород используется в основном соотношение прочностей на одноосное сжатие в естественно-сухом и водонасыщенном состояниях, то есть коэффициент размягчаемости. При снижении прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии на 10 % порода считается водоустойчивой, на 20–30 % – пониженной водоустойчивости, на 50 % и более – слабой водоустойчивости. Согласно этому критерию, на Коневинском месторождении существенная часть пород имеет пониженную водоустойчивость. Известно, что размягчаемые

Таблица 4

Снижение прочностных свойств пород на обводненных участках
локального растепления на Коневинском месторождении

Table 4

Decrease in rock strength properties in localized-thawing
water-encroached zones (Konevinskoye deposit)

Прочностные свойства		Наименование породы		
		Березит	Гранодиорит	Березитизированный гранодиорит
В естественно- сухом состоянии	Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	15,27	18,06	15,98
	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	76,95	98,12	90,48
	Сцепление τ , МПа	21,8	27,5	25,27
В водонасыщенном состоянии	Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	12,47	12,55	11,11
	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	71,35	76,58	41,71
	Сцепление τ , МПа	19,74	20,78	13,11
Снижение прочностных свойств в результате водонасыщения	Предел прочности при растяжении σ_p , %	22	32	30
	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, %	9	25	54
	Сцепление τ , %	9	24	48

породы обладают пониженной морозостойкостью, то есть размягчаемость является косвенным признаком способности пород сопротивляться воздействию периодически замерзающей и оттаивающей воды. Поэтому обнажения размягчаемых горных пород в переходных зонах мерзлых пород в талые в случае их техногенного растепления быстро разрушаются.

Так, сравнительно недавно на Ирокиндинском руднике при введении в эксплуатацию новых технологий (использование самоходного оборудования вместо электротранспорта) произошло локальное оттаивание ранее мерзлых горизонтов. На наиболее трещиноватых участках с видимыми прослоями льда резко понизилась устойчивость горных выработок, отмечены факты разрушения их кровли и стенок.

Учитывая то, что многие рудные месторождения в многолетнемерзлых поро-

дах отрабатываются системами с открытым очистным пространством, в техногенно растепленных участках повышается опасность лавинообразно формирующегося обрушения больших обнажений кровли очистных камер. В ранее устойчивых неудароопасных массивах становятся возможными проявления горных и горно-тектонических ударов.

Установлено, что на верхних горизонтах рудников, в мерзлых породах как прочность горных пород, так и устойчивость их обнажений повышается вследствие цементирующего фактора мерзлоты [1–9]. В переходных областях мерзлых пород в талые прочностные свойства пород, а следовательно, и устойчивость горных выработок и целиков значительно уменьшаются. При понижении горных работ до области талых пород при технологическом или сезонном растеплении горных выработок их устойчивость ухудшается.

Количественную оценку прочности массива горных пород в криолитозоне предлагается производить, корректируя исходные характеристики (предел прочности на одноосное сжатие, растяжение и др.) с помощью дифференцированного коэффициента структурного ослабления пород [1, 2, 4–6, 8, 15 и др.]. Используя эту методику, представляется возможным оценить коэффициенты запаса прочности горных пород при их различных обнажениях и определить допустимые техногенные напряжения в них.

Коэффициент структурного ослабления K_c для горных пород криолитозоны по этой методике предлагается определять с учетом дифференцированного поправочного коэффициента, учитывающего влияние отрицательных температур из выражения:

$$K_c = \frac{1}{0,53(l/l_{\text{бл}} + 1,175)} + 0,315 + \Delta,$$

где l – линейный размер оцениваемого на прочность участка массива, м; $l_{\text{бл}}$ – линейный размер структурного блока, м; Δ – дифференцированный поправочный коэффициент, учитывающий влияние отрицательных температур.

Величина l в этом случае равна максимальному линейному размеру

оцениваемого на устойчивость обнажения породы (стенки камеры, мощности целика, высоте выработки). Значения коэффициента Δ принимаются дифференцированно: для мерзлых пород – 0,4; переходных зон мерзлых пород в талые – 0,1–0,2; талых пород – 0.

Линейные размеры структурного блока $l_{\text{бл}}$ удобно оценивать по фотодокументации керна. Фотодокументированный керн является достоверным надежным источником первичной геологической информации о структуре массивов горных пород рудных месторождений.

Методика оценки размера структурного блока принимается следующая. Вначале по скважинам определяется интенсивность трещиноватости (удельная трещиноватость), выражаемая в количестве трещин на один погонный метр. Выделяется 5–10 статистически значимых классов, затем вычисляются средневзвешенное по массиву значение удельной трещиноватости и средневзвешенный размер структурного блока.

В качестве примера приведем оценку прочностных свойств массива горных пород для условий отработки верхних горизонтов Кедровского золоторудного месторождения (табл. 5, рис. 2).

Таблица 5

**Распределение удельной трещиноватости
в массиве горных пород Кедровского месторождения**

Table 5

**Distribution of specific rock fracturing
in the Kedrovskoye deposit**

Класс интенсивности трещиноватости, количество трещин на 1 м (от и до)		Распределение по классам, м	Распределение по классам, %
1	3	217	25
4	6	425	49
7	9	130	15
10	12	61	7
13	И более	35	4
Средневзвешенная по массиву интенсивность трещиноватости, количество трещин на 1 м		5,5	
Средний размер структурного блока, м		0,18	

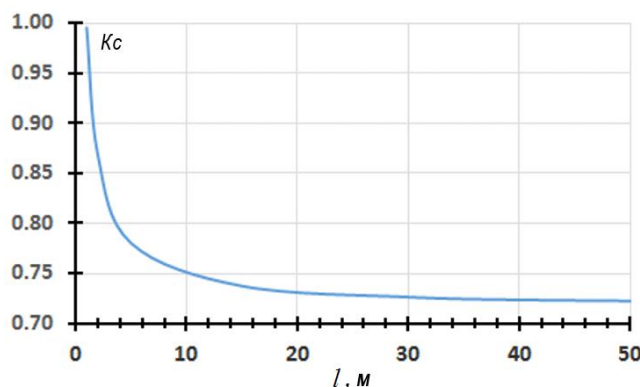


Рис. 2. Коэффициент структурного ослабления массива K_c многолетнемерзлых горных пород Кедровского месторождения при различных пролетах горных выработок и очистных камер l , м
Fig. 2. Structure slackening coefficient for the K_c permafrost rock mass (the Kedrovskoye deposit) at various spans of mine workings and treatment chambers l , m

Получены следующие характеристики параметров трещиноватости массива горных пород. Среднестатистическое значение интенсивности трещиноватости равно 5,54 трещин на один погонный метр, Среднее расстояние между трещинами (средний размер структурного блока) равно 18 см. Породы на действующих горизонтах мерзлые до глубин 250–300 м. Минимальный коэффициент структурного ослабления K_c равен 0,72 (см. рис. 2). Средняя прочность горных пород верхних горизонтов месторождения: на сжатие – 91,2 МПа, на растяжение – 19,7 МПа [3]. Таким образом, в наиболее неустойчивых условиях прочность массива на сжатие составит 65,7 МПа, на растяжение – 13,8 МПа. Естественно, при растеплении горных пород под действием природных или техногенных факторов прочность массива этих же горных пород значительно уменьшится.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

При разработке рудных месторождений, расположенных в криолитозоне, можно выделить три устойчивых типа геомеханических условий по криогенному состоянию пород: зона постоянной

мерзлоты, переходная зона мерзлых пород в талые и зона постоянно талых пород. Наиболее простые геомеханические условия наблюдаются в постоянно мерзлых породах. Лед цементирует горные породы, сами породы находятся в наиболее прочном естественно-сухом состоянии, природные напряжения соответствуют гидростатической гипотезе Гейма. Геомеханические условия в переходных зонах мерзлых пород в талые усложняются: появляется тектоническая составляющая природного напряженного поля, горные породы размягчаются под воздействием растаявшего льда, постепенно разрушаются от периодического фазового перехода воды из льда и обратно при температурном режиме, близком к 0 °С. В этих областях при оценке геомеханических условий необходимо учитывать как степень размягчаемости пород при водонасыщении, так и их морозостойкость. В постоянно талых породах из влияющих факторов остается только размягчаемость пород под действием воды.

В общем случае прочностные и деформационные свойства горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений рекомендуется определять дифференцированно:

– для условий постоянной криолитозоны – в естественно-сухом состоянии пород;

– для условий переходных пород в талые – в водонасыщенном состоянии после не менее 25 циклов замораживания-оттаивания (согласно стандарту на испытания морозостойкости пород); такие результаты будут наиболее близки к производственным;

– для условий постоянно талых пород – в зависимости от гидрогеологических характеристик в естественно-сухом и водонасыщенном состоянии.

Переход от прочностных свойств горных пород в образцах к их свойствам в массиве предлагается производить на основе дифференцированного коэффициента структурного ослабления с учетом факторов мерзлоты, трещиноватости и геометрических размеров обнажений горных выработок [1, 4–6].

Оценку потенциальной удароопасности массивов горных пород и склонности горных пород к хрупкому разрушению

рекомендуется производить с учетом их криогенного состояния:

– для многолетнемерзлых пород – по прочностным свойствам, определенным в естественно-сухом состоянии;

– для талых пород – в водонасыщенном состоянии;

– для переходных зон мерзлых пород в талые – после соответствующей процедуры замораживания-оттаивания водонасыщенных пород.

В зависимости от решаемой инженерно-геомеханической задачи склонность пород к хрупкому разрушению рекомендуется оценивать на основе базовых методов: по критерию Г.Н. Кузнецова, по критерию запредельного деформирования или комбинированным способом.

По результатам исследований разработан ряд методических и нормативных документов по управлению горным давлением и определению параметров подземных геотехнологий для условий разработки рудных месторождений, расположенных в криолитозоне [15].

Библиографический список

1. Сосновский Л.И., Павлов А.М., Филонюк В.А., Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н., Рубцов Л.Г. Управление геомеханическими процессами при разработке наклонных жил в условиях многолетней мерзлоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 11. С. 77–83.

2. Сафьянов А.С., Сосновская Е.Л. Геомеханические условия массива горных пород Коневинского золоторудного месторождения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11 (94). С. 98–103.

3. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Прогноз потенциальной удароопасности Кедровского золоторудного месторождения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 11 (106). С. 50–56.

4. Павлов А.М., Семенов Ю.М. Управление горным давлением в криолитозоне при обработке наклонных маломощных жил на примере Ирокиндинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 11. С. 30–34.

5. Семенов Ю.М. Температурный режим горного массива в криолитозоне на руднике «Ирокинда» // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. С. 228–231.

6. Павлов А.М., Семенов Ю.М., Сосновский Л.И. Определение параметров устойчивых целиков и обнажений камер при разработке наклонных жил в криогенных зонах в условиях Ирокиндинского золоторудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 5. С. 142–147.

7. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов. Новосибирск: Наука, 1975. 175 с.

8. Разумов Е.А., Еременко В.А., Зяятдинов Д.Ф., Матвеев А.С., Гречишкин П.В., Позолотин А.С. Методика расчета параметров анкерной крепи подземных горных выработок в условиях вечной мерзлоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 9. С. 39–47.

9. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and constraints of engineering frozen backfill for underground mining applications in permafrost // Proceedings of the 10th International symposium on cold regions development. Alaska, 2013. P. 175–190.

10. Kight G., Harris M., Gorski B., Udd J.E. Frozen backfill research for Canadian mines. Canada: Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994. 21 p.

11. Katsikadelis J.T. Boundary elements: theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 2002. 336 p.

12. Wardle L.J., Crotty J.M. Two-dimensional boundary integral equation analysis for non-

homogeneous mining applications // Recent advances in boundary element methods. London: Pentech, 1978. P. 233–252.

13. Reddy J.N. An introduction to nonlinear finite element analysis. Oxford: Oxford University Press, 2004. 488 p.

14. Kattan P.I., Voyiadjis G.Z. Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools. Berlin: Springer, 2002. 113 p.

15. Неганов В.П., Сосновский Л.И., Сосновская Е.Л., Давиденко А.А. Опыт проектирования подземных рудников в ОАО «Иргиредмет» // Горный журнал. 2011. № 4. С. 16–18.

References

1. Sosnovskii L.I., Pavlov A.M., Filonyuk V.A., Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N., Rubtsov L.G. Control of geotechnical processes when mining inclined veins in permafrost conditions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2006, no. 11, pp. 77–83. (In Russ.).

2. Safyanov A.S., Sosnovskaya E.L. Geotechnical conditions of the Konevinskoe gold field. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 11 (94), pp. 98–103. (In Russ.).

3. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Forecast of potential rock-burst hazard of Kedrovskoye gold mine. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. (106), pp. 50–56. (In Russ.).

4. Pavlov A.M., Semenov Yu.M. Control of rock pressure in permafrost when mining inclined low-thickness veins: Irokindinskoye field case. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2007, no. 11, pp. 30–34. (In Russ.).

5. Semenov Yu.M. *Temperaturnyi rezhim gornogo massiva v kriolitozone na rudnike «Irokinda»* [Temperature conditions of permafrost rock mass at "Irokinda" mine]. *Problemy osvoeniya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri* [Development of Eastern Siberia's mineral resources]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2009, pp. 228–231. (In Russ.).

6. Pavlov A.M., Semenov Yu.M., Sosnovskii L.I. Evaluation of parameters of stable pillars and room roofs in underlay lode mining in cryogenic zones in terms of the Irokindinsky gold deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2008, no. 5, pp. 142–147. (In Russ.).

7. Votyakov I.N. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva merzlykh i ottaivayushchikh gruntov* [Physical-mechanical properties of frozen and thawing soils]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1975, 175 p. (In Russ.).

8. Razumov E.A., Eremenko V.A., Zayatdinov D.F., Matveev A.C., Grechishkin P.V., Pozolotin A.C. Calculation of rock bolting parameters for mine roadways in permafrost rocks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2013, no. 9, pp. 39–47. (In Russ.).

9. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and constraints of engineering frozen backfill for underground mining applications in permafrost. Proceedings of the 10th International symposium on cold regions development. Alaska, 2013, pp. 175–190.

10. Kight G., Harris M., Gorski B., Udd J.E. Frozen backfill research for Canadian mines. Canada: Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994, 21 p.

11. Katsikadelis J.T. Boundary elements: theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 2002, 336 p.

12. Wardle L.J., Crotty J.M. Two-dimensional boundary integral equation analysis for non-homogeneous mining applications. Recent advances in boundary element methods. London: Pentech, 1978, pp. 233–252.

13. Reddy J.N. An introduction to nonlinear finite element analysis. Oxford: Oxford University Press, 2004, 488 p.

14. Kattan P.I., Voyiadjis G.Z. Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools. Berlin: Springer, 2002, 113 p.

15. Neganov V.P., Sosnovskii L.I., Sosnovskaya E.L., Davidenko A.A. Experience of designing of underground mines at "IRGIREDMET" public corporation. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2011, no. 4, pp. 16–18. (In Russ.).

Критерии авторства / Authorship criteria

Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю., Батжаргал Долгурсурэн написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Arkady N. Avdeev, Elena L. Sosnovskaya, Alexander Yu. Bolotnev, Batjargal Dolgorsuren are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

Сведения об авторах / Information about the authors



Авдеев Аркадий Николаевич,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Arkady N. Avdeev,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamina-Sibiryaka st., Yekaterinburg, 620075, Russia,
e-mail: avdeev0706@mail.ru



Сосновская Елена Леонидовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Elena L. Sosnovskaya,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher,
Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamina-Sibiryaka st., Yekaterinburg, 620075, Russia,
e-mail: avdeev0706@mail.ru



Болотнев Александр Юрьевич,

кандидат технических наук,
технический руководитель лаборатории геомеханики и физики горных пород кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: abolotnev@mail.ru

Alexander Yu. Bolotnev,

Cand. Sci. (Eng.),
Technical Director at the Laboratory of Geomechanics and Rock Physics,
Department of Mineral Deposit Mining,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: abolotnev@mail.ru



Батжаргал Долгорсурэн,

горный инженер,

аспирант,

Институт недропользования,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

e-mail: Doogii.do@mail.ru

Batjargal Dolgorsuren,

Mining Engineer,

Post-graduate student,

Institute of Subsoil Use,

Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,

e-mail: Doogii.do@mail.ru