

## СТАТЬИ

УДК 622.026.5:551.34

## ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТРУДНОСТИ ЭКСКАВАЦИИ ВЗОРВАННОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

**Алькова Е.Л., Панишев С.В., Максимов М.С.**

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск,  
e-mail: nelealc12@rambler.ru, bsdpsv@mail.ru, mexes\_07@mail.ru*

В статье представлены результаты экспериментальных исследований прочностных свойств многолетнемерзлых пород применительно к оценке трудности выемки взорванного смерзающегося массива. Объективная оценка основных характеристик разрушенного массива позволяет корректно подобрать вскрышное оборудование и обосновать режим его работы. Мерзлые породы обладают значительной прочностью, подготовка их к выемке ведется с помощью буровзрывных работ. Выделяемое при взрыве тепло ведет к изменению свойств многолетнемерзлых пород. В полевых условиях очень сложно получить сдвиговые характеристики смерзающихся вскрышных пород в развале. Ограниченный выбор оборудования и методик для таких исследований подтолкнул авторов к изготовлению собственного лабораторного стенда и искусственно приготовленных образцов, которые имитируют структуру смерзающегося взорванного массива, а также разработке уникальной методики, которая в данных условиях позволяет получать достоверные показатели прочности на срез. Именно прочность на срез является основной характеристикой для расчета относительного показателя трудности экскавации, предложенного академиком Ржевским В.В. Выявлены основные факторы, влияющие на повторное смерзание уже разрушенного массива. Дана оценка полученных зависимостей основных механических и прочностных характеристик взорванного массива при различных варьируемых параметрах гранулометрического состава, температуры и влажности. На основе этих данных произведен расчет показателя трудности экскавации. Установлено, что смерзающаяся взорванная горная масса обладает как свойствами нарушенной среды, так и свойствами однородного массива. Поэтому расчет показателя трудности экскавации по формуле для разрушенного массива применительно к взорванным многолетнемерзлым породам не корректен, что приводит к занижению данного показателя и, как следствие, неверному выбору выемочного оборудования.

**Ключевые слова:** смерзание, трудность экскавации, вскрышные породы, прочность на срез (сдвиг)

## ESTIMATION OF THE RELATIVE INDICATOR OF EXCAVATION OF THE EXCAVATED MASSIVE UNDER CRYOLITHOZONE

**Alkova E.L., Panishev S.V., Maksimov M.S.**

*Mining Institute of the North named N.V. Cherskiy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, e-mail: nelealc12@rambler.ru, bsdpsv@mail.ru, mexes\_07@mail.ru*

The article presents the results of experimental studies of the strength properties of permafrost in relation to the assessment of the difficulty of excavating a blasted freezing rock mass. An objective assessment of the main characteristics of the destroyed massif allows you to correctly select the overburden equipment and justify its operating mode. Frozen rocks have significant strength, their preparation for excavation is carried out using drilling and blasting operations. The heat released during the explosion leads to a change in the properties of permafrost. In the field, it is very difficult to obtain the shear characteristics of freezing overburden in the breakup. The limited choice of equipment and methods for such studies prompted the authors to manufacture their own laboratory bench and artificially prepared samples that simulate the structure of a frozen blasted rock mass, as well as to develop a unique technique that, under these conditions, allows obtaining reliable indicators of shear strength. It is the shear strength that is the main characteristic for calculating the relative indicator of excavation difficulty proposed by Academician V.V. Rzhnevsky. The main factors influencing the repeated freezing of an already destroyed massif are revealed. An assessment of the obtained dependences of the main mechanical and strength characteristics of the blasted rock mass is given for various varied parameters of grain composition, temperature and humidity. Based on these data, the excavation difficulty index was calculated. It has been established that the frozen blasted rock mass has both the properties of a disturbed environment and the properties of a homogeneous massif. Therefore, the calculation of the excavation difficulty indicator according to the formula for the destroyed massif applied to the blasted permafrost rocks is not correct, which leads to an underestimation of this indicator and, as a consequence, the wrong choice of excavation equipment.

**Keywords:** freezing, excavation difficulty, overburden, shear strength (shear)

Горнодобывающая промышленность является одной из ведущих отраслей России, и наибольший вклад в общий объем добычи полезных ископаемых вносит Дальний Восток, и в частности Якутия. Якутия – район освоения месторождений в суровом

климате, где горные работы ведутся при низких температурах. Ввиду значительной прочности мерзлых пород, больших объемов горных работ подготовка их к выемке на многих предприятиях республики ведется буровзрывным способом. Но и это

не упрощает добычу полезного ископаемого в таких условиях, так как после буровзрывной подготовки происходит смерзание горной массы уже в развале, что значительно усложняет процесс экскавации вплоть до ее невозможности по силовым характеристикам оборудования.

Выбор выемочного оборудования основывается на прочностных характеристиках подготовленного буровзрывным способом массива. Для эффективной работы экскаваторов, в условиях смерзания породы после проведенных буровзрывных работ, выбор типа и модели выемочного оборудования необходимо осуществлять с учетом всех особенностей смерзшегося взорванного массива.

Проблемами ведения горных работ в условиях многолетнемерзлых грунтов занимаются ученые разных стран. Исследуются прочностные характеристики пород для определения устойчивости бортов карьеров и отвалов [1; 2], для усовершенствования рабочего органа выемочного оборудования [3–5], а также ведутся исследования прочностных характеристик грунтов в области строительства [6–8]. В ИГДС им. Н.В. Черского СО РАН в лаборатории «Открытые горные работы» много лет изучается проблема смерзания горной массы после взрыва, так как эта проблема актуальна при разработке многолетнемерзлых пород. Для изучения прочности смерзшихся пород на срез в лабораторных условиях был сконструирован стенд, представленный на рис. 1. Стенд позволяет выполнять исследования на образцах большого размера. Способ изготовления уникального образца, который имитирует структуру смерзающегося взорванного массива, защищен патентом 2629610 [9].

Данные, полученные в ходе испытаний на сконструированном стенде, позволяют судить о прочности на срез исследуемых мерзлых пород, так как этот показатель один из основных показателей прочности пород.

Цель исследования: на основе выявленных свойств смерзшегося после буровзрывных работ массива оценить изменение трудности его экскавации.

#### Материалы и методы исследования

Для определения прочности на срез подготавливают образец, который имитирует структуру взорванного массива многолетнемерзлых пород. Образец помещают в срезную коробку, состоящую из неподвижной (1) и подвижной (2) частей (рис. 1). Диаметр срезной коробки составляет 350 мм, высота – 175 мм. С помощью регулировочного винта (3) через динамометр (4) создается вертикальная нагрузка на образец. Горизонтальная нагрузка создается домкратом (5) с помощью насоса (6). Регистрация давления в системе осуществляется в Барах по цифровому манометру МА 100 Ц (7), который подключен к измерительному комплексу «Мера» (8). Обработка полученных результатов производится программой DigitalMaster.

Прочностные характеристики пород изменяются в зависимости от глубины залегания, так как давление верхней толщи горной массы уменьшает наличие пор внутри развала, что приводит к его упрочнению. Особенностью многолетнемерзлых пород является наличие замерзшей воды и низкая температура, что также сказывается на прочности пород. Еще одна составляющая, которую необходимо учитывать при исследовании прочностных характеристик, это гранулометрический состав взорванной горной массы.

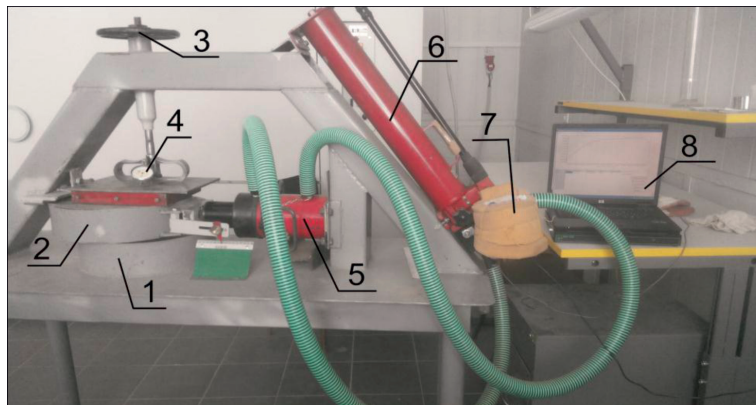


Рис. 1. Натурный стенд исследования образцов на срез

Поэтому для изготовления образцов и проведения исследований были выбраны следующие характеристики взорванной горной массы, применительно к условиям эксплуатации Кангаласского бурогоугольного месторождения (табл. 1).

**Таблица 1**  
Основные характеристики  
изготавливаемых образцов

	Наименование характеристики	Значения
1.	Температура смерзания (t), град.	-5
		-10
		-15
2.	Влажность (w), %	5
		10
		15
3.	Гран состав (dcp.), мм	10
		20
		40
4.	Нагрузка на образец при формировании (P), МПа	Без уплотнения
		1,6
		3,1

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведенных лабораторных испытаний образцов, имитирующих разрушенный смерзающийся массив, показали изменение основных прочностных характеристик и физико-механических свойств пород, при различных влажностных и температурных состояниях взорванного массива. Выбранные для исследования характеристики основаны на многолетнем опыте и натурных исследованиях вскрышных по-

род непосредственно на Кангаласском бурогоугольном месторождении. Так, например, на глубине развала 10 м породы испытывают нагрузку верхней толщи разрушенных пород в 1,6 МПа, с увеличением глубины до 20 м эта нагрузка составляет 3,1 МПа.

Чем мельче разрушена порода, тем однороднее будет развал на глубине. При исследовании образцов с включениями среднего размера 40 мм на срезе отчетливо видны замороженные «кубики» (рис. 2). При испытаниях образцов с меньшим размером включений, а также с увеличением давления на образец до 3,1 МПа характер среза уже иной, более похож на однородный.

Ранее опубликованные исследования [10; 11] демонстрировали взаимосвязь прочности образца с влажностью породы и температурой смерзания. Причем существеннее влияет на прочность смороженного образца влажность, следующей по значимости является температура замораживания породы в образце.

В данной статье представлены результаты исследований, выполненных на лабораторном стенде для образцов породы в диапазоне влажности от 10 до 15% и температуры -5 – -15 °С. Влажность породы в 5% в данных исследованиях не рассматривалась, так как образцы не поддавались формированию даже при замораживании образца при температуре -15 °С. Данный факт позволил определить критическую влажность вскрышных пород Кангаласского месторождения, выше которой начинается процесс смерзания разрушенной взрывом горной массы, и влажность, при которой повторного смерзания породы уже не происходит.



Рис. 2. Иллюстрация поверхности среза однородного образца и образца с включениями

По полученным данным, в ходе лабораторных испытаний были определены угол внутреннего трения пород и структурное сцепление. На рис. 3 представлены графики изменения угла внутреннего трения и структурного сцепления при различных значениях влажности породы в образце, температуры смерзания и размера включений в образец смороженных кусков.

Установлено, что угол внутреннего трения снижается, а структурное сцепление

увеличивается в 2 раза (по сравнению с однородной структурой) при включении в образец наполнителя диаметром 20–40 мм. При включении в образец наполнителя размером 50 мм происходит снижение структурного сцепления в 1,3 раза, а угол внутреннего трения снижается в 1,15 раза при влажности породы 15% и температуре смерзания -15°C.

Прочность на срез при различных условиях проведения эксперимента представлена на рис. 4.

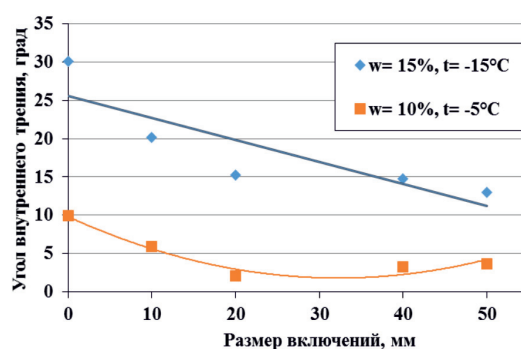
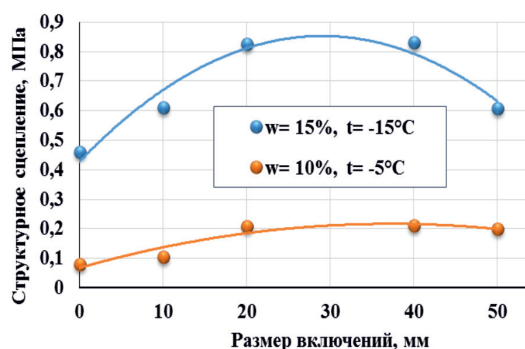
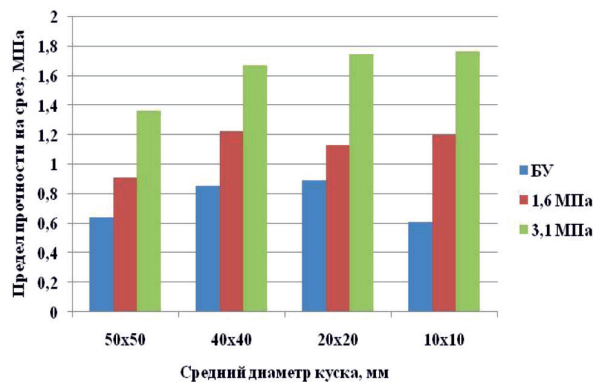
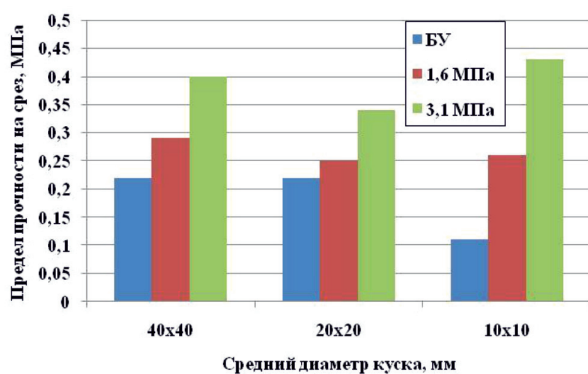


Рис. 3. Изменения физико-механических характеристик смерзающихся пород в зависимости от кусковатости взорванного массива



а

	БУ	1,6 МПа	3,1 МПа
50x50	0,64	0,91	1,36
40x40	0,85	1,22	1,67
20x20	0,89	1,13	1,74
10x10	0,61	1,2	1,76



б

	бу	1,6 МПа	3,1 МПа
40x40	0,22	0,29	0,4
20x20	0,22	0,25	0,34
10x10	0,11	0,26	0,43

Рис. 4. Изменение прочности образца при различном диаметре включений и уплотнении: а – при температуре смерзания -15°C и влажности 15%; б – при температуре смерзания -5°C и влажности 10%

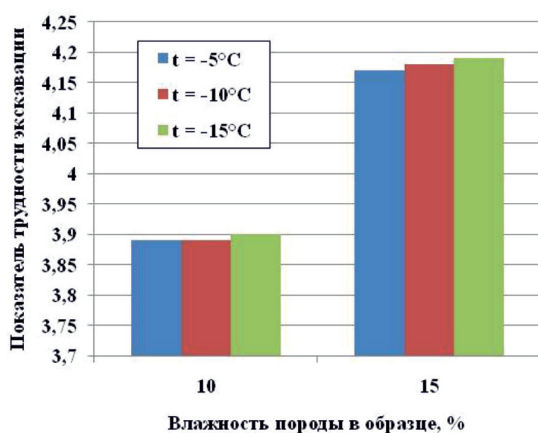


Для полученных значений предела прочности на срез на образцах нарушенной структуры был применен подход, предложенный академиком Ржевским В.В. [12], который позволил рассчитать показатель трудности экскавации с использованием формулы нарушенного массива. Показано, что основное влияние на показатель трудности экскавации смерзшейся взорванной горной массы оказывают влажность и granulометрический состав (рис. 5).

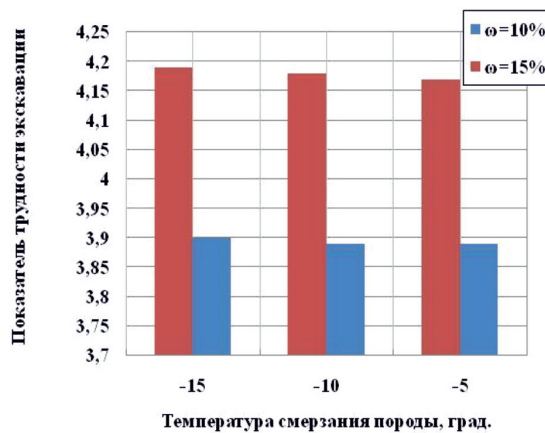
Проведенные экспериментальные исследования позволили констатировать тот факт, что разрушенные породы, находящиеся в развале на глубине 20 метров, становятся по прочности сравнимы с породами

изначального, не разрушенного буровзрывными работами массива при различных состояниях. Так, например, прочность на срез разрушенных смерзающихся пород влажностью 15% и температурой  $-15^{\circ}\text{C}$  составляет 1,67–1,76 МПа при различной кусковатости массива, что соответствует прочности пород не разрушенного массива при тех же показателях состояния породы на глубине 10 метров.

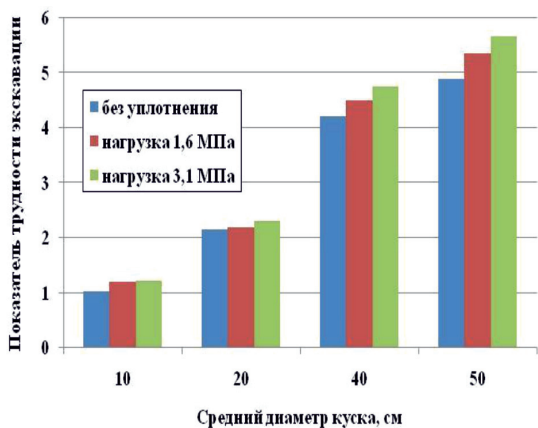
Полученные расчетным путем значения показателя трудности экскавации по формулам, предложенным академиком Ржевским В.В. для выемки из массива и для выемки разрушенных пород, представлены в табл. 2.



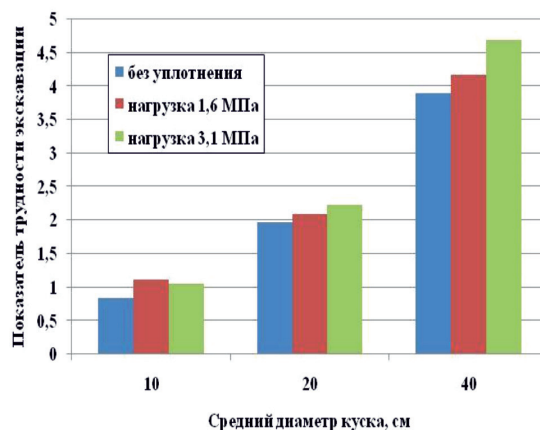
а



б



в



г

Рис. 5. Влияние различных состояний породы на трудность выемки взорванного массива: а – при различной влажности; б – при изменении температуры породы; в – при изменениях диаметра куска, удельной нагрузки при влажности 15% и температуре смерзания  $-15^{\circ}\text{C}$ ; г – среднего диаметра куска и удельной нагрузки при влажности 10% и температуре смерзания  $-5^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

Значения показателя трудности выемки взорванного массива при различных его состояниях

W = 15%, t = -15°C					
Наименование	Однородная структура P = 1,6 МПа	Нарушенная структура, нагрузка P = 3,1 МПа			
		50 мм	40 мм	20 мм	10 мм
Прочности на срез, МПа	1,65	1,36	1,67	1,74	1,76
Показатель трудности экскавации	10,81	$\frac{5,66}{9,1^*}$	$\frac{4,73}{10,99^*}$	$\frac{2,3}{11,4^*}$	$\frac{1,15}{11,5^*}$
W = 10%, t = -15°C					
Прочности на срез, МПа	0,75		0,41	0,62	0,79
Показатель трудности экскавации	5,18		$\frac{3,98}{3,03^*}$	$\frac{2,12}{4,4^*}$	$\frac{1,1}{5,5^*}$

Примечание: в числителе значения, рассчитанные по формуле выемки разрушенного массива, в знаменателе – по формуле выемки из однородного массива.

**Выводы**

Экспериментальными исследованиями искусственно созданных образцов было получено большое количество значений физико-механических и прочностных характеристик смерзающегося разрыхленного буровзрывными работами массива. Эти данные впоследствии послужат основой для разработки специальной методики оценки показателя трудности экскавации разрушенного массива в условиях криолитозоны. Необходимость в разработке методики продиктована тем, что расчетные значения данного показателя, определенные по методике академика Ржевского В.В., не отражают достоверно состояние такой среды. Поэтому, только учитывая все различные изменения физико-механического состояния многолетнемерзлых пород в развале, можно корректно определить показатель трудности экскавации и, как следствие, верно выбрать выемочное оборудование и обосновать режим его работы.

**Список литературы / References**

1. Цирель С.В., Гапонов Ю.С., Павлович А.А. Гранулометрический состав, сдвиговая прочность разрушенных горных пород и их влияние на устойчивость отвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельная статья (специальный выпуск). М.: Издательство «Горная книга», 2013. № 12. 12 с.

Tsirel S.V., Gaponov Yu.S., Pavlovich A.A. Granulometric composition, shear strength of destroyed rocks and their influence on the stability of dumps // Gornyy informatsionno-analicheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal). Otdel'naya stat'ya (spetsial'nyy vypusk). M.: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2013. No. 12. 12 p. (in Russian).

2. Гапонов Ю.С. Геомеханическое обоснование устойчивости породных отвалов с учетом влияния характеристик

разрушенной горной массы: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2015. 20 с.

Gaponov Yu.S. Geomechanical substantiation of the stability of rock dumps taking into account the influence of the characteristics of destroyed rock mass: avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk. Sankt-Peterburg, 2015. 20 p. (in Russian).

3. Недорезов И.А. Прогнозирование трудности разработки грунтов землеройными машинами // Строительные и дорожные машины. 2008. № 2. С. 43–44.

Nedorezov I.A. Prediction of the difficulty of soil development by earth-moving machines // Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny. 2008. No. 2. P. 43–44 (in Russian).

4. Васильев С.И., Ереско С.П. Исследование прочностных характеристик сезонно-мерзлых грунтов Сибири и Севера // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1 (5). С. 93–99.

Vasiliev S.I., Eresko S.P. Research of strength characteristics of seasonally frozen soils of Siberia and the North // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2010. No. 1 (5). P. 93–99 (in Russian).

5. Шемякин С.А., Иванченко С.Н., мамаев Ю.А. Ведение открытых горных работ на основе совершенствования выемки пород. М.: Издательство «Горная книга», 2008. 315 с.

Shemyakin S.A., Ivanchenko S.N., Mamaev Yu.A. Conducting open pit mining based on the improvement of rock excavation. M.: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2008. 315 p. (in Russian).

6. Liu J., Lv P., Cui Y., Liu J. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface, Cold Regions Sci. and Tech. 2014. Vol. 104–105. P. 1–6.

7. Lu P. and Liu J. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface TiedaoXuebao, J. of the China Railway Society. 2015. Vol. 37 (2). P. 106–110.

8. Anvari S.M., Shooshpasha I., Kutanaei S.S. Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9 (5). P. 936–944.

9. Панишев С.В., Ермаков С.А., Алькова Е.Л., Максимов М.С., Козлов Д.С. Способ изготовления смерзшихся образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород // Патент на изобретение RU 2629610 С, 30.08.2017. Заявка № 2016121595 от 31.05.2016.

Panishhev S.V., Ermakov S.A., Alkova E.L., Maksimov M.S., Kozlov D.S. A method of manufacturing frozen samples, structurally comparable to the blasted rock mass // Patent na izobreteniyе RU 2629610 С, 30.08.2017. Zayavka № 2016121595 ot 31.05.2016. (in Russian).

10. Панишев С.В., Алькова Е.Л., Максимов М.С. К оценке показателя трудности экскавации смерзающегося взорванного массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 3. С. 31–36.

Panishev S.V., Al'kova E.L., Maksimov M.S. Assessment of excavatability index in freezable blasted rock mass // Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh. 2019. Vol. 55. No. 3. P. 371–375.

11. Панишев С.В., Максимов М.С., Алькова Е.Л. Исследование прочностных характеристик мерзлых образцов

однородной и нарушенной структуры // Успехи современного естествознания. 2018. № 11 (2). С. 383–388.

Panishev S.V., Maksimov M.S., Alkova E.L. Investigation of the strength characteristics of frozen samples of homogeneous and disturbed structure // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. 2018. No. 11 (2). P. 383–388 (in Russian).

12. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. М.: Недра, 1978. 541 с.

Rzhevsky V.V. Processes of open mining. M.: Nedra, 1978. 541 p. (in Russian).