

УДК 66.061.34:579.66

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МЕРЗЛЫХ ОБРАЗЦОВ ОДНОРОДНОЙ И НАРУШЕННОЙ СТРУКТУРЫ****Панишев С.В., Максимов М.С., Алькова Е.Л.***Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, e-mail: bsdpsv@mail.ru,  
mexes\_07@mail.ru, NeleAlc12@rambler.ru*

Значительный объем подготовки горных пород к выемке в северных регионах осуществляется путем взрывного рыхления. Практика ведения горных работ на месторождениях зоны многолетней мерзлоты показывает, что после буровзрывной подготовки происходит смерзание горной массы в развале. Прочность вторично смерзающихся взорванных пород значительно возрастает, что приводит к невозможности ее экскавации по силовым характеристикам оборудования, осложняет ведение горных работ и снижает эффективность разработки месторождений. В связи с этим большой практический интерес представляет изучение физико-технических, теплофизических характеристик смерзшегося взорванного массива многолетнемерзлых горных пород, что позволит дать достоверную оценку его горно-технологических свойств для обоснования и выбора эффективных технологий разработки месторождений криолитозоны. В Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН на протяжении ряда лет проводятся натурные и лабораторные исследования процесса повторного смерзания взорванной горной массы и его влияния на ведение горных работ в условиях месторождений криолитозоны. В статье представлены сравнительные результаты лабораторных исследований изменчивости прочности породы на срез, угла внутреннего трения и структурного сцепления на однородных образцах и образцах структурно сопоставимых с взорванным массивом. Выполненными исследованиями установлено, что определяющими факторами, оказывающими влияние на прочность на срез, угол внутреннего трения и величину сцепления в образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом, являются их температура, влажность, и величина уплотнения, что характерно и для образцов однородной структуры. Взаимосвязь предела прочности пород на срез с величиной нормального давления для образцов структурно сопоставимых с взорванным массивом аналогично образцам однородной структуры подчиняется также закону Кулона – Мора.

**Ключевые слова:** мерзлые горные породы, прочностные характеристики, повторное смерзание, прочность пород на срез, угол внутреннего трения, включения

**STUDY OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF FROZEN SAMPLES  
OF HOMOGENEOUS AND DISTURBED STRUCTURE****Panishv S.V., Maksimov M.S., Alkova E.L.***Mining Institute of the North named N.V. Cherskiy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, e-mail: bsdpsv@mail.ru, mexes\_07@mail.ru, NeleAlc12@rambler.ru*

A great content of preparation of rocks for excavation in the northern regions is carried out by explosive loosening. The practice of mining at the deposits of the permafrost zone shows that after drilling and blasting the freezing of the rock mass occurs in the collapse. The strength of the secondarily frozen blasted rocks increases significantly, which leads to the impossibility of its excavation according to the power characteristics of the equipment, complicates mining operations and reduces the efficiency of deposit development. In this regard, the study of the physico-technical and thermophysical characteristics of the frozen exploded massif of permafrost rocks is of great practical interest, which will make it possible to give a reliable assessment of its mining and technological properties to substantiate and select efficient technologies for the development of cryolithozone deposits. For a number of years at the Institute of Mining of the North. N.V. Cherskiy Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences has conducted field and laboratory studies of the process of the re-freezing of a blasted rock mass and its influence on the mining conditions of the cryolithozone deposits. The article presents the comparative results of laboratory studies of the variability of rock strength shear, the angle of internal friction and structural cohesion on homogeneous samples and samples structurally comparable to the blown up massif. Studies have established that the determining factors affecting the shear strength, the angle of internal friction and the amount of adhesion in samples structurally comparable to the blasted massif are their temperature, humidity, and the amount of compaction, which is also characteristic of samples of homogeneous structure. The relationship of the shear strength of rocks for with the value of normal pressure for samples structurally comparable to the blown up massif, similarly to samples of a homogeneous structure, is also subject to the Coulomb-Mora law. According to the results of the performed studies, on samples of large size structurally comparable to the exploded rock mass, it is established that the relative size of the inclusions does not have a decisive influence on the magnitude of the angle of internal friction and the cohesion of the rock.

**Keywords:** frozen rocks, strength characteristics, re-freezing, shear strength, internal friction angle, inclusion

Как известно, в условиях многолетней мерзлоты подготовку к выемке мерзлого массива горных пород ведут буровзрывными работами. Мерзлая порода с течением времени повторно смерзается и превращается в смерзшийся монолит, вследствие

чего прочность разрабатываемого взорванного массива увеличивается в разы, тем самым значительно осложняя работу горной техники. Поэтому достоверная оценка прочностных характеристик взорванного массива в условиях его повторного смерза-

ния очень важна для правильного выбора выемочного оборудования и прогноза эффективности его работы в данных условиях. Важной прочностной характеристикой горных пород является сопротивляемость пород срезу (сдвигу), определяемая силами внутреннего трения в породе, связностью породы и структурным сцеплением [1].

Исследования прочностных характеристик пород и грунтов всегда имеют большое значение для решения многих инженерных и иных задач в самых различных отраслях промышленности, строительства и науки. Так, исследователи иранского Технологического университета им. Ноширвани ведут работы по изучению прочностных характеристик грунтов применительно к промышленному и гражданскому строительству, возведению различных грунтовых сооружений [2]. Целью данных исследований является увеличение прочностных характеристик грунтов различными материалами, что очень важно при укреплении склонов холмов и строительстве в сейсмоопасных районах.

Сотрудниками университета была выполнена серия испытаний на сдвиг образцов, состоящих из песчано-гранулированных резиновых смесей с различным содержанием гранулированного каучука при различных относительных плотностях и усилиях нормального давления, а также определены углы их внутреннего трения. Полученными результатами исследований установлено, что гранулированный каучук улучшает прочность на сдвиг мелкозернистого песка при средней относительной плотности и незначительном усилии давления и что такая песчано-гранулированная резиновая смесь может быть эффективно использована в качестве простейшего и наиболее доступного материала для сооружения различных насыпей и фундаментов. При этом степень увеличения прочности на сдвиг зависит от содержания резины, относительной плотности и усилия давления. Результаты также показали, что с увеличением содержания гранулированного каучука песок становится более пластичным. Это важно при применении таких смесей в роли геотехнической сейсмической изоляции различных конструкций и сооружений.

Исследования прочностных характеристик мерзлых грунтов, в сфере строительства ведутся китайскими учеными [3, 4]. В рамках изучения механических свойств мерзлых грунтово-бетонных сопряжений ими были проведены экспериментальные исследования прочности на сдвиг в зависи-

мости от таких факторов, как нормальное давление, температура и содержание влаги. Исследования прочности примерзания грунтовой смеси к бетонному основанию выполнялись на специальном стенде, состоящем из встроеного охлаждающего поддона, специальных устройств для передачи горизонтальной и вертикальной нагрузки (сервомоторы), системы автоматической регистрации напряжений, смещения и температуры. Испытания проводились на образцах большого размера. Размер бетонного основания образца составлял 300×300×100 мм. Перед испытанием бетонное основание помещалось во встроенный охлаждающий поддон, на котором производилась укладка исследуемого грунта. Грунт через вертикальный модуль загрузки подвергался уплотнению до необходимой величины и затем замораживался в течение 18–24 ч. После полной заморозки проводятся испытания на сдвиг.

По результатам экспериментов было отмечено, что весь процесс сдвига можно разделить на пять этапов: этап эластичности, этап пластичности, этап скольжения, этап упрочнения и этап стабилизации остаточной прочности. Были получены эмпирические уравнения, характеризующие взаимосвязи прочности на сдвиг с влияющими факторами, даны объяснения изменчивости пиковой и остаточной прочностей на сдвиг в данных условиях. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что пиковая прочность на сдвиг изменяется линейно по отношению к нормальному давлению и температуре, но нелинейно зависима от содержания влаги.

В Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН ранее выполнялись работы по изучению повторного смерзания горных пород. А.П. Винокуровым исследовались основные факторы, влияющие на прочность смерзания мерзлых пород при сдвиге [5]. Суть исследования заключалась в смораживании образцов кубической формы по плоскости смерзания, которая предварительно подвергалась тепловой обработке, затем помещалась в приспособление для передачи усилия нормального давления. После чего проводилось испытание на испытательной машине UTS-250, путем выдавливания среднего из трех образцов. В результате проведенных экспериментальных исследований на образцах кубической формы было установлено, что при понижении температуры смораживания от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$  пород прочность смерзания при сдвиге увеличивается в 3,1 раза.

Были определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на прочность смерзания при сдвиге – это влажность пород и глубина растепленного слоя между кусками. Так, при увеличении влажности с 10% до 24% прочность смерзания возрастала в 8–11 раз, а при увеличении глубины растепленного слоя от 1,5 мм до 9,2 мм – в 1,4–4,21 раза. Следует отметить, что кубические образцы небольшого размера (5x5x5 см), на которых выполнялись испытания, далеко не в полной мере характеризуют физико-техническое и теплофизическое состояние смерзшегося взорванного массива многолетнемерзлых горных пород. В связи с вышеизложенным целью проведенных исследований было получение сравнительных данных о прочности на срез образцов однородной и нарушенной структуры. Отличительной особенностью проводимых исследований являлось то, что оценка прочности породы на срез в условиях повторного смерзания выполнялась на образцах большого размера, структурно сопоставимых с взорванным массивом [6]. Исследования велись согласно специально разработанной «Методике исследования прочности смерзшихся вскрышных горных пород на срез» [7].

**Материалы и методы исследования**

Исходным материалом явились вскрышные породы, представленные песками и песчаниками Кангаласского месторождения бурых углей, то есть связующее и включения – один и тот же материал. Включения представляют собой отдельно смороженные разного размера кубики из песчаника при различной температуре, влажности. Метод исследований – лабораторные испытания подготовленных образцов, не имеющих плоскости смерзания, на срез в специально разработанном и сконструированном в ИГДС СО РАН стенде. Основным элементом стенда является срезная коробка, состоящая из подвижной и неподвижной обойм с внутренним диаметром 350 мм и высотой 175 мм. Вес одного образца применительно к вскрышным породам Кангаласского месторождения составляет 27 кг. С помощью гидравлического домкрата и ручного насоса создается горизонтальная сдвигающая нагрузка. Конструкция сдвигового прибора обеспечивает горизонтальное сдвигающее усилие на образец до 56 тс.

Методикой исследований предусматривается изготовление образцов как однородной структуры, так и нарушенной структуры, сопоставимой с взорванным массивом. Изготовление смерзшегося образца, струк-

турно сопоставимого с взорванным массивом, состоит из двух этапов. Этап первый заключается в приготовлении в специальном решетчатом поддоне включений кубической формы, уплотнение которых производят методом вибрации. Влажность породы, размер включений и величина уплотнения образца задается в соответствии с методикой исследований. После уплотнения включения замораживают до заданной экспериментом температуры.

Второй этап – это изготовление самого образца для испытания на стенде, путем перемешивания мерзлых включений со связующим. Для этого поддон с ячейками разбирают, вынимают включения и выдерживают их при комнатной температуре некоторое время до появления конденсата на поверхности, способствующего лучшему сцеплению со связующим.

Включения и связующее перемешивают и помещают в специально изготовленную разъемную цилиндрическую форму (гильзу). После этого сформированный в гильзе образец замораживается в климатической камере, в соответствии с условиями эксперимента. Контроль температуры в образце осуществляется с помощью термопары. После замораживания разъемную гильзу разбирают и подготовленный образец подвергают испытанию на стенде. На рис. 1 показан схематический вид сверху изготовленного образца, структурно сопоставимого с взорванным массивом.

По результатам проведенных исследований получены предварительные сравнительные данные об изменчивости прочности на срез, угла внутреннего трения и структурного сцепления на однородных образцах и образцах структурно сопоставимых с взорванным массивом – нарушенных образцов с включениями.

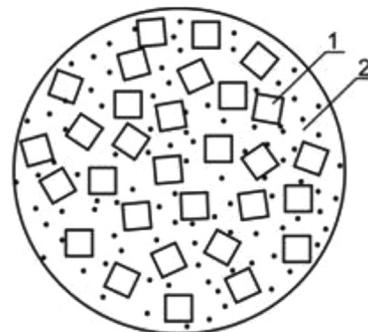


Рис. 1. Вид сверху изготовленного смерзшегося образца, структурно сопоставимого с взорванным массивом горных пород: 1 – включения; 2 – связующее

### Результаты исследования и их обсуждение

В рамках исследований были получены данные о прочности на срез образцов однородной структуры, при изменении температуры, влажности и их уплотнении. Также были получены данные о прочности на срез образцов нарушенной структуры, при максимальных и минимальных значениях влажности и температуры в естественном состоянии, и подвергшихся уплотнению нагрузками в 1,6 и 3,1 МПа. На рис. 2 представлена гистограмма с результатами испытаний образцов однородной и нарушенной структуры с влажностью 15% и температурой  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Указанные усилия уплотнения (1,6 и 3,1 МПа) соответствуют примерным условиям сжимающего давления пород на глубинах 10 и 20 м от поверхности развала взорванной горной массы применительно к вскрышным породам Кангаласского бурового месторождения.

Как видно из гистограммы, с увеличением нагрузки при уплотнении образцов однородной и нарушенной структуры сопротивляемость испытуемых образцов срезу увеличивается. Это характерно для образцов однородной и нарушенной структуры. При этом следует отметить, что сопротивляемость срезу уплотненных образцов однородной структуры больше, чем у об-

разцов нарушенной структуры. Добавление включений разного размера в образцы с целью имитации условий взорванной среды уменьшает поверхности сцепления между зернами, вследствие чего сопротивляемость срезу образцов такой структуры оказывается ниже.

Это наглядно подтверждается результатами испытания образцов нарушенной структуры, где образцы, с размером включений  $40\times 40\times 40$  мм для всех случаев испытаний показали меньший предел прочности на срез по отношению к образцам с размером включений  $20\times 20\times 20$  мм.

На рис. 3 представлены полученные экспериментальным путем зависимости угла внутреннего трения (а) и сцепления (б) от температуры породы для образцов однородной структуры с различной влажностью.

Как видно из рисунка, значения сцепления и угла внутреннего трения значительно изменяются с понижением температуры образцов и увеличением влажности. Так, угол внутреннего трения при понижении температуры образцов от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$  в диапазоне влажности 10% – 15% увеличивается примерно в 2 раза. При влажности образцов 5% в этом же диапазоне температур угол внутреннего трения увеличивается в 3 раза. Величина структурного сцепления с понижением температуры увеличивается от 2,5 до 4,6 раза в зависимости от влажности образца.

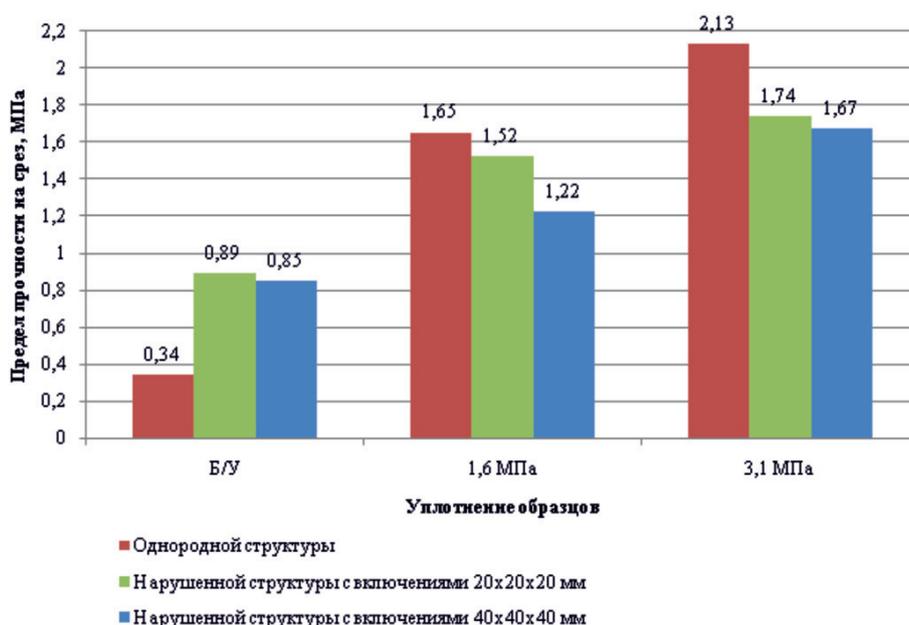


Рис. 2. Изменение прочности образцов на срез для различных условий их уплотнения

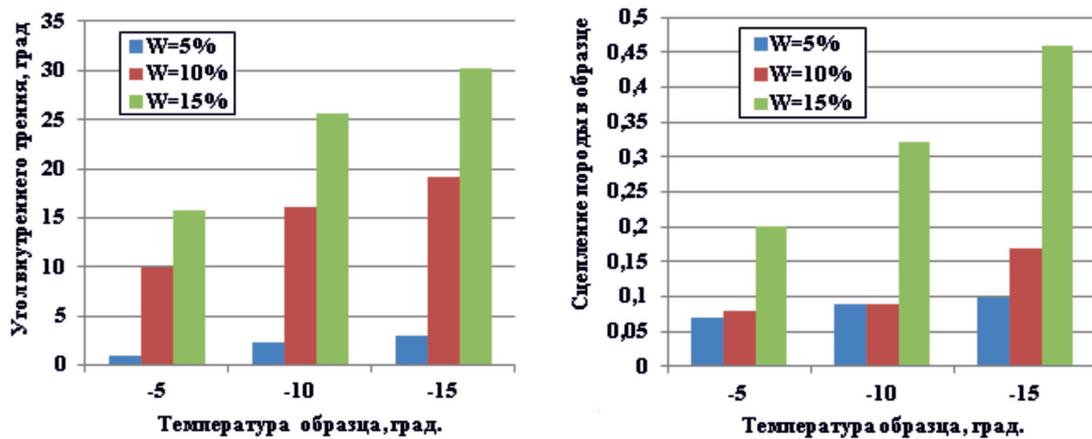


Рис. 3. Зависимость угла внутреннего трения и сцепления в образце однородной структуры от влажности и температуры породы

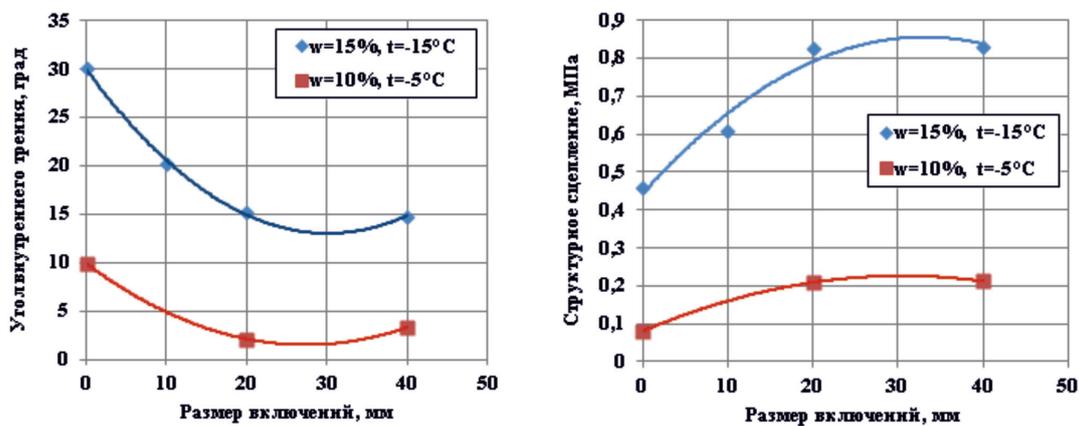


Рис. 4. Влияние температуры и влажности пород на угол внутреннего трения и сцепления при исследовании образцов нарушенной структуры

На рис. 4 представлены полученные экспериментальным путем значения угла внутреннего трения и сцепления от температуры и влажности породы при исследовании образцов нарушенной структуры с включениями. Испытания проводились при следующих граничных условиях: при влажности образцов 10% и температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  и при влажности образцов 15% и температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ . Формирование образцов влажностью 5% не увенчалось успехом, так как даже при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  образцы не смерзались, что позволяет говорить о критической влажности по условию повторного смерзания для этих пород в 5%.

Как видно из полученных данных, значения сцепления и угла внутреннего трения при испытании образцов нарушенной

структуры значительно изменяются с понижением температуры образцов и увеличением влажности, как и при испытаниях однородных образцов. При температуре заморозки породы в образце  $-15^{\circ}\text{C}$  и влажности 15% наблюдается снижение угла внутреннего трения с увеличением размеров включений. Причем резкое снижение, в 2 раза, наблюдается при включении в песчаник наполнителя размером 10 и 20 мм, дальнейшее увеличение размеров включений до 40 мм не показало выраженного изменения угла внутреннего трения. При влажности 10% и температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  угол внутреннего трения снижается в 4 раза при включении в образец мороженых кубиков со стороной 20 мм. С увеличением размера включений с 20 до 40 мм происходит неко-

торое увеличение угла внутреннего трения на  $1,2^\circ$ . При этом структурное сцепление в образце с увеличением размеров включений растёт. Можно предположить, что при температуре  $-5^\circ\text{C}$  и влажности пород 10% увеличение угла внутреннего трения с увеличением размера включений происходит за счет дилатансионного разуплотнения, которое препятствует сдвигу. При более высокой влажности и низкой температуре этого разуплотнения не наблюдается.

При понижении температуры образцов от  $-5^\circ\text{C}$  до  $-15^\circ\text{C}$  в диапазоне влажности 10–15% угол внутреннего трения увеличивается примерно в 4,5 раза. Величина структурного сцепления с понижением температуры и влажности в этих же диапазонах увеличивается также примерно в 4,6 раза.

### Выводы

Выполненными исследованиями установлено, что определяющими факторами, оказывающими влияние на прочность на срез, угол внутреннего трения и величину сцепления в образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом, являются их температура, влажность и величина уплотнения, как и для образцов однородной структуры. Взаимосвязь предела прочности пород на срез с величиной нормального давления для образцов структурно сопоставимых с взорванным массивом подчиняется также закону Кулон – Мора, аналогично образцам однородной структуры.

По результатам выполненных исследований на образцах большого размера, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород, установлено, что для вскрышных пород Кангаласского месторождения в диапазоне включений 10–20 мм происходит резкое снижение угла внутреннего трения. Дальнейшее увеличение размера включений с 20 до 40 мм на величину угла внутреннего трения и величину струк-

турного сцепления породы решающего значения не оказывает.

Полученные результаты исследований, представленные в статье, служат дальнейшему раскрытию механизма формирования прочностных характеристик смерзающейся взорванной горной массы в условиях месторождений криолитозоны.

### Список литературы / References

1. Маслов Н.Н. Инженерная геология. М.: Стройиздат, 1941. 431 с.

Maslov N.N. Engineering geology. M.: Strojizdat, 1941. 431 p. (in Russian).

2. 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. V. 9. Issue 5. P. 936–944. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.03.008.

3. Liu J., Lv P., Cui Y., Liu J. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil–concrete interface. Cold Regions Science and Technology. 2014. V. 104–105. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.04.007.

4. Lu P., Liu J. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface. Tiedao Xuebao. Journal of the China Railway Society. 2015. V. 37. Issue 2. P. 106–110.

5. Винокуров А.П. Исследование процессов смерзаемости горных пород в условиях месторождений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S10. С. 75–82.

Vinokurov A.P. Investigation of the processes of rock congelation in the conditions of deposits of cryolithozone // Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2011. № S10. P. 75–82 (in Russian).

6. 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 РФ № 2629610. Патентообладатель ФГБУН ИГДС им. Н.В. Черского СО РАН. 2017.

Panishhev S.V., Ermakov S.A., Alcova E.L., Maximov M.S., Kozlov D.S. Way of production of the frozen together samples structurally comparable to the blown-up massif of rocks. Patent RF № 2629610. Patentoobladatel' FGBUN IGDS im. N.V. Cherskogo SO RAN. 2017. (in Russian).

7. Алькова Е.Л., Панишев С.В., Козлов Д.С., Максимов М.С. Экспериментальные исследования прочности на срез мерзлых горных пород на образцах большого размера // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 145–149.

Alcova E.L., Panishev S.V., Kozlov D.S., Maksimov M.S. Experimental Research on Shear Strength of Frozen Rocks on Large Samples // Advances in current natural sciences. 2016. № 8. P. 145–149 (in Russian).