

УДК 624.131.4

ПРОЧНОСТЬ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОСЫПИ КАРЬЕРА «ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ»

Захаров Е.В.

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук»,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru,

Свойства мерзлых грунтов определяются многими факторами и существенно зависят от температуры, влажности, гранулометрического состава, насыпного веса и т.д. Для выяснения характера деформирования и разрушения образцов мерзлых грунтов, отобранных с берегов техногенного озера, образованного на дне отработанного карьера «Интернациональный», были проведены исследования их основных физико-механических свойств и испытания на одноосное сжатие искусственно изготовленных образцов кубической формы с ребром 100 мм. Проведенные испытания показали, что в исследуемом грунте отсутствуют легкорасторвимые соли, но в незначительном количестве присутствуют среднерасторвимые (загипсованность 1,12%). Ввиду незначительного содержания солей замораживание образцов происходит при минимальной отрицательной температуре. Прочность мерзлых образцов значительно увеличивается с понижением температуры, однако при нижнем и верхнем пределе пластичности практически не отличается. Получены линейные зависимости прочности мерзлых грунтов, отобранных со дна карьера «Интернациональный», от температуры при различной влажности. В мерзлом состоянии при температуре -3 °C и влажности 16% средняя прочность искусственно изготовленных образцов составляет 2,34 МПа, а при влажности 26% – 2,93 МПа. С дальнейшим понижением температуры до -5 °C средняя прочность образцов породы возрастает до 4 МПа, а при температуре -10 °C средняя прочность образцов породы достигает 7 МПа. Определено, что при температуре ниже -7 °C исследуемые грунты переходят в разряд скальных грунтов малой прочности.

Ключевые слова: отрицательная температура, мерзлые грунты, прочность, одноосное сжатие, карьер
«Интернациональный»

STRENGTH OF FROZEN ROCKS OF SHADE INTERNATIONAL QUARRY

Zakharov E.V.

Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences”, N.V. Chersky Institute of Mining of the North SB RAS,
Yakutsk, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru

The physical and mechanical properties of frozen soils are determined by many factors and significantly depend on temperature, humidity, granulometric composition, bulk weight, etc. To elucidate the nature of deformation and destruction of frozen soil samples taken from the shores of the technogenic lake formed at the bottom of the worked-out quarry “Internatsionalny”, studies of their basic physical and mechanical properties and tests for uniaxial compression of artificially made samples of a cubic shape with an edge of 100 mm were carried out. The tests carried out showed that there are no readily soluble salts in the studied soil, but moderately soluble salts are present in a small amount (gypsum content 1,12%). Due to the low salt content, samples are frozen at a minimum negative temperature. The strength of frozen specimens increases significantly with decreasing temperature, but practically does not differ at the lower and upper limits of plasticity. Linear dependences of the strength of frozen soils taken from the bottom of the “International” quarry on temperature at different humidity were obtained. In a frozen state at a temperature of -3 °C and a humidity of 16%, the average strength of artificially made samples is 2.34 MPa, and at a humidity of 26% – 2,93 MPa. With a further decrease in temperature to -5 °C, the average strength of rock samples increases to 4 MPa, and at a temperature of -10 °C, the average strength of rock samples reaches – 7 MPa. It has been determined that at temperatures below -7 °C, the studied soils pass into the category of rocky soils of low strength.

Keywords: negative temperature, frozen soils, strength, uniaxial compression, International quarry

В настоящее время в связи с сокращением минерально-сырьевой базы алмазодобывающим компаниям приходится осуществлять добычу сырья в крайне сложных горно-геологических условиях. К таким условиям можно отнести добычу подкарьерных запасов в АК «АЛРОСА». Объектом исследования в настоящей работе выступали грунты, отобранные со дна карьера «Интернациональный». Разработка кимберлитовой трубки «Интернациональная» открытым способом завершена в 1981 г.

на глубине 285 м и с 1999 г. (1, 2 очередь) ведется подземным способом, производительность рудника 500 тыс. т в год. С момента прекращения открытых горных работ поверхность бортов карьера подвергалась выветриванию. В результате образования осипей уступы карьера сработаны на 90% [1, с. 42]. В настоящее время, по данным АК «АЛРОСА», дно карьера «Интернациональный» представляет собой водонасыщенный массив грунтов мощностью 45 м с наличием на поверхности техногенного озера.

Таблица 1

Свойства грунта

Наименование параметра	Показатель
Плотность истинная (крупность 2–5 мм)	2905 кг/м ³
Плотность истинная мелкой фракции (крупность < 0,1 мм)	2709 кг/м ³
Влажность исходная	3,5 %
Верхний предел пластичности	25,9 %
Нижний предел пластичности	16,3 %
Число пластичности	9,4 %
Максимальная плотность по верхнему пределу пластичности	1876 кг/м ³
Максимальная плотность по нижнему пределу пластичности	1832 кг/м ³
Степень засоления (загипсованность)	1,12 %

Так как при отработке трубы открытым способом вскрытия метегро-ичерского водоносного комплекса не произошло [2, с. 19], то вода в карьер поступает в основном с атмосферными осадками и весенними паводками. Наличие в карьере «Интернациональный» пузырькообразной грунтовой массы и воды представляет существенную опасность для подземной отработки подкарьерных запасов [3, с. 49]. Для обеспечения безопасности ведения горных работ в подземном руднике «Интернациональный», предусмотрен предохранительный рудный целик, оценка состояния которого посвящен ряд работ [4–6].

Целью выполненной работы явилось определение прочностных показателей мерзлых грунтов, отобранных с берегов техногенного озера, образованного на дне отработанного карьера «Интернациональный». Одновременно оценивалась возможность формирования льдопородного предохранительного массива путем искусственного промораживания обводненной грунтовой осыпи, находящейся на дне карьера, при помощи жидкостных замораживающих колонок [7, с. 88].

Для выяснения характера деформирования и разрушения образцов мерзлых горных пород, отобранных с берегов техногенного озера, были проведены исследования их свойств и испытания на одноосное сжатие искусственно изготовленных образцов кубической формы с ребром 100 мм. Общая масса пробы, предоставленной институтом «Якутипроалмаз» АК «АЛРОСА», составляла около 330 кг.

Предварительно в соответствии с ГОСТ 12536-2014 [8, с. 3] был проведен гранулометрический анализ с разделением исследуемой породы на классы при промывке их водой. По данным анализа в исходной поро-

де содержится 45 % материала крупностью менее 0,1 мм, а доля крупнообломочных частиц (более 10 мм) составляет 35 %. Цвет образцов светло-серый и коричневый, по минералогическим признакам порода относится к алевролитам и мергелям с включением крупнообломочных фракций известняка. Проведенные нами ранее исследования показали [9–11], что вмещающие породы алмазоносных трубок, представленные мергелями и алевролитами, имеют крайне низкую морозостойкость, особенно в водонасыщенном состоянии. Это приводит к дезинтеграции породы и, как следствие, ее осыпанию с поверхности бортов карьера [12, с. 41].

На основании ГОСТ 5180-2015 [13, с. 3–5], ГОСТ 25100-2020 [14], а также используя ускоренный метод определения максимальной плотности [15], были определены свойства исследуемого грунта (табл. 1).

Материалы и методы исследования

Прочность мерзлых грунтов, отобранных со дна карьера «Интернациональный», определяли при одноосном сжатии искусственно изготовленных образцов кубической формы с ребром 100 мм. Влажность грунта соответствовала нижнему и верхнему пределу пластичности, температура испытаний: -3 °C, -5 °C и -10 °C.

Исследуемый грунт просеивали через сито с ячейками 10 мм с целью удаления крупной фракции и высушивали при температуре 105±5 °C до достижения постоянной массы. Сухой грунт разделяли на две группы, добавляли в них дистиллиированную воду и в течение 5 мин перемешивали миксером для получения однородной массы с заданной влажностью (16 % и 26 %). Далее, приготовленную грунтовую массу послойно помещали в отсеки металлической кассеты

с размерами ячеек 100x100x100 мм, боковые поверхности и дно которой были покрыты фторопластовой лентой для предотвращения примерзания к ним влажного грунта.

Уплотнение грунта в ячейках кассеты осуществляли вручную. Для этого ячейки послойно наполняли грунтом, высотой примерно 2 см, и при помощи вибрационного воздействия (постукиванием) добивались его уплотнения в ячейках кассеты под собственным весом до того момента, пока грунт переставал утрамбовываться. После окончания укладки и уплотнения грунта в металлической кассете верхнюю часть образцов (излишки) срезали металлическим шпателем.

Кассеты с уложенным грунтом оберывали в несколько слоев полиэтиленовой пленкой для предотвращения потерь влаги, снабжали термодатчиком, располагающимся в центре образца, и помещали в морозильную камеру Tira TCC 7160. В морозильной камере образцы выдерживали до достижения ими заданной температуры (-3 °C, -5 °C и -10 °C) и дополнительно выставляли при ней не менее 6 ч для обеспечения полного замораживания образцов. Время замораживания и выдержки образцов при температуре -10 °C составляло около суток, а при температурах -3 °C и -5 °C – более двух суток.

Замороженные образцы грунта вынимали из морозильной камеры и разбирали в низкотемпературной камере объемом 30 м³ при отрицательных температурах, близких к температурам замораживания. На рис. 1 приведен образец изготовленного мерзлого грунта правильной кубической формы после распалубки кассеты.

При разборе кассеты на полиэтиленовой пленке, применявшейся для предотвращения потерь влаги образцами, а также на изготовленных образцах наблюдался иней и лед. Случаев разрушения мерзлых образцов при разборе кассеты не происходило, что свидетельствует об их полном смерзании даже при минимальной исследуемой влажности (16%) и небольшой отрицательной температуре -3 °C.

Перед испытанием на гидравлическом прессе изготовленные грунты взвешивали для контроля качества их изготовления и определения объемной плотности. Плотность изготовленных образцов при влажности 16% составила 2,2 г/см³, а при влажности 26% – 2,08 г/см³.

Прочность на одноосное сжатие искусственно изготовленных кубических образцов мерзлого грунта определяли при помощи гидравлического пресса фирмы Toni

Technik серии ToniNORM, обладающего максимальной нагрузкой в 600 kN. Для исключения теплового влияния плит испытательной машины на испытуемые образцы применяли сменные прокладки из стали (150x150x8 мм), которые вместе с замораживаемыми образцами выдерживали в морозильной камере при заданных температурах, а при испытаниях устанавливали между верхней и нижней плоскостью образца.



Рис. 1. Взвешивание образца после распалубки металлической кассеты

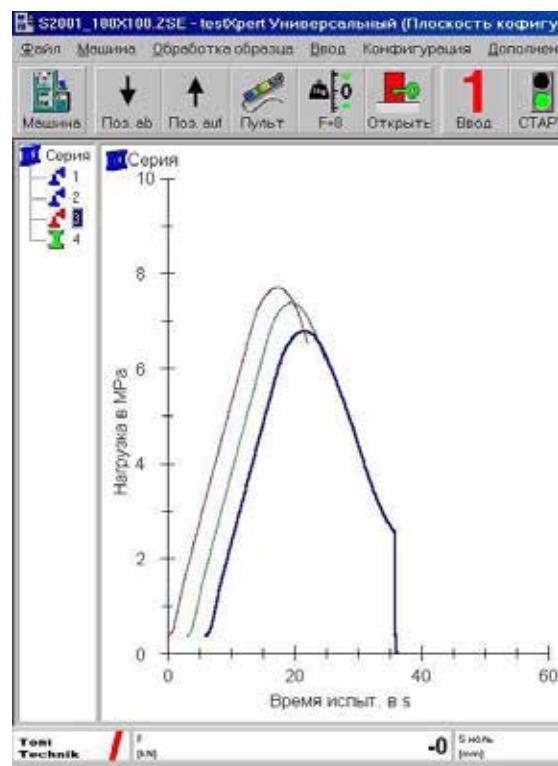


Рис. 2. Графики нагружения образцов (W16%, t = -10 °C)

Таблица 2

Прочность образцов в зависимости от температуры и влажности

Температура, °C	Прочность, МПа			Средняя прочность, МПа
Влажность – 16 %				
-3	2,5	2,32	2,2	2,34
-5	4	4,4	4,4	4,27
-10	6,77	7,4	7,7	7,29
Влажность – 26 %				
-3	3,1	2,8	2,9	2,93
-5	3,9	4	3,8	3,90
-10	6,5	6,7	6,5	6,57

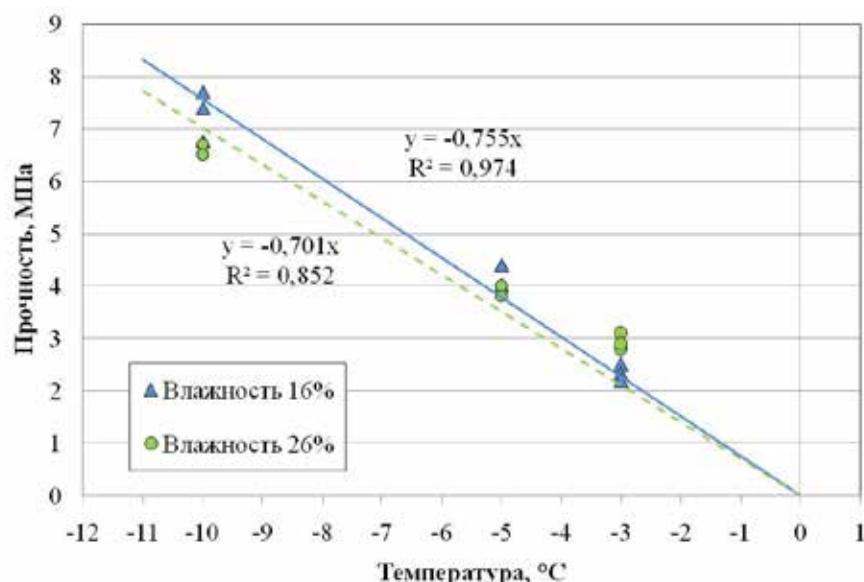


Рис. 3. Зависимость прочности мерзлых образцов от температуры при различной влажности

Результаты выполненных исследований по определению прочности мерзлых грунтов, отобранных со дна карьера «Интернациональный», приведены в табл. 2 и на рис. 2.

На рис. 3 приведен график зависимости прочности при одноосном сжатии мерзлых образцов исследуемого грунта от температуры и различной влажности. Точками обозначены данные, полученные в ходе исследования, и добавлены линейные тренды. Проведенные испытания показали, что прочность мерзлых образцов исследуемого грунта увеличивается с понижением температуры.

Ввиду отсутствия в породе легкорастворимых солей и наличия незначительного количества среднерастворимых солей, а именно гипса (1,12%), замерзание грунта происходит даже при минимальной от-

рицательной температуре и влажности. В мерзлом состоянии при температуре -3 °C и влажности 16% средняя прочность образцов грунта составляет 2,34 МПа, а при влажности 26% – 2,93 МПа. При температуре -5 °C средняя (по двум влажностям) прочность мерзлых грунтов составляет 4 МПа. При дальнейшем понижении температуры до -10 °C прочность мерзлых образцов увеличивается на 70% и достигает 7 МПа.

При испытаниях на прессе, под нагрузкой, первоначальная кубическая форма образцов деформируется, значительно изменяются их геометрические размеры, но полного разрушения образцов на отдельные составляющие не происходит (рис. 4). Стоит отметить, что при испытаниях пород влажностью 26% по нижней кромке образца выступала

влага, чего не наблюдалось при испытаниях образцов с влажностью 16% (рис. 5).



Рис. 4. Характерная форма разрушения образцов при сжатии на прессе ($W = 26\%$)

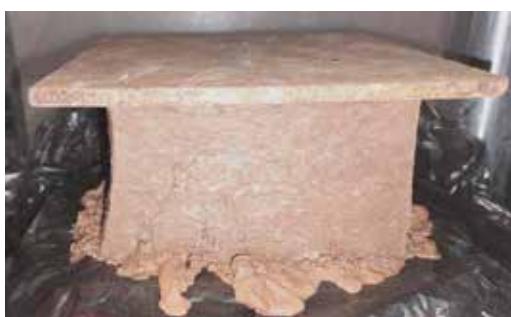


Рис. 5. Выступившая влага при испытаниях образцов ($W = 26\%$)

Заключение

Проведенными исследованиями было установлено, что грунт, отобранный с берегов техногенного озера, образованного на дне отработанного карьера «Интернациональный», относится к незасоленным грунтам, в среднем на 35% состоит из крупнообломочных фракций и 45% частиц размером менее 0,1 мм, что соответствует дресвино-щебенистому грунту с суглинистым заполнителем.

На искусственно изготовленных образцах определена прочность на одноосное сжатие мерзлых грунтов со дна карьера «Интернациональный» в зависимости от температуры и влажности. Согласно полученным данным при температуре ниже -7°C исследованные грунты переходят в разряд малопрочных скальных грунтов ($R_c > 5 \text{ МПа}$).

Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Список литературы

1. Колганов В.Ф., Акишев А.Н. Коренные месторождения алмазов Западной Якутии. Справочное пособие. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2011. 215 с.
2. Янников А.М. Гидрогеология глубоких горизонтов вмещающих толщ трубы «Интернациональная» (Республика Саха (Якутия)): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Воронеж, 2019. 187 с.
3. Айбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Красюкова Е.В. Обоснование параметров опасных зон при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений Якутии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 48–60.
4. Барышников В.Д., Барышников Д.В., Гахова Л.Н. Геомеханическая оценка и контроль состояния предохранительного целика при его подработке // Интерэкско ГеоСибирь. 2018. Т. 5. С. 279–284. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-5-279-284.
5. Барышников В.Д., Бокий И.Б., Гахова Л.Н., Барышников Д.В. Закономерности формирования геомеханического состояния подкарьерного целика при подземной отработке запасов на руднике «Интернациональный» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 3. С. 257–268. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-251-262.
6. Коваленко А.А., Захаров Н.Е., Пуль Э.К., Золотин В.Г. Геомеханические аспекты разработки кимберлитового месторождения трубы «Интернациональная» // Горный журнал. 2019. № 2. С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.05.
7. Курилко А.С., Соловьев Д.Е. Формирование льдо-породного массива на дне отработанного кимберлитового карьера «Интернациональный» АК «АЛРОСА» с использованием жидкостных замораживающих колонок принудительного действия // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 88–95. DOI: 10.17513/use.37846.
8. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
9. Захаров Е.В. Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород: специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»: автореф. дис. канд. техн. наук. Якутск, 2011. 18 с.
10. Захаров Е.В., Курилко А.С. Энергоемкость разрушения скальных пород алмазных месторождений Якутии после циклов замораживания-оттаивания // Обогащение руд. Руда и металлы. 2018. № 5. С. 11–16. DOI: 10.17580/or.2018.05.02.
11. Захаров Е.В., Курилко А.С. Изменение удельной поверхности горных пород под влиянием циклов замораживания-оттаивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 31–38. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-31-38.
12. Слепцов В.И., Курилко А.С. Расчет динамики осыпания бортов карьера для карбонатных пород разной морозостойкости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 34–41.
13. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.
14. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.
15. Инструкция по определению требуемой плотности и контролю за уплотнением земляного полотна автомобильных дорог. ВСН 55-69. Минтрансстрой СССР. Утверждена Министерством транспортного строительства СССР 12 марта 1969 г. ОРГТРАНССТРОЙ. М., 1969. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/46/46671/index.htm> (дата обращения: 20.09.2022).