

# Влияние воздействий поверхностно-активных веществ на прочность образцов мерзлых вскрышных горных пород угольных месторождений криолитозоны

Д.В. Хосоев✉, В.В. Киселев

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск,  
Российская Федерация  
✉ hosoev70@mail.ru*

**Резюме:** Жесткие климатические условия криолитозоны с продолжительным зимним периодом и наличием многолетней мерзлоты существенно замедляют ведение всех технологических процессов разработки месторождений открытым способом. Сопротивление копанью горной техникой промерзших горных пород на угольных разрезах может быть снижено путем их предварительного разупрочнения с применением поверхностно-активных веществ. В статье рассмотрено разупрочняющее влияние водных растворов поверхностно-активных веществ на образцы из мерзлых вскрышных пород. Авторы показывают, что обработка пород растворами оптимального состава и концентрации приводит к снижению их прочности, что позволяет повысить эффективность применения поточных технологий на базе роторно-конвейерных комплексов и горных комбайнов. Изложены экспериментальные данные прочностных характеристик искусственно изготовленных образцов из вскрышных пород Кангаласского угольного месторождения, насыщенных растворами поверхностно-активных веществ различной концентрации. Авторы отмечают, что наибольшее снижение прочности образцов достигается при применении водного раствора хлористого алюминия  $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ . Приведены результаты экспериментов, выполненных с целью установления зависимости влияния дистиллированной воды  $H_2O$  и растворов хлорида натрия  $NaCl$  различной концентрации на прочностные свойства мелкозернистых песчаников Эльгинского каменноугольного месторождения, которые подтверждают, что при температуре  $-10^\circ C$  достигается максимальное снижение прочности образцов до 55%, а при понижении температуры с  $-10$  до  $-20^\circ C$  наблюдается незначительное повышение прочности образцов. Авторы высказывают предположение, что применение поверхностно-активных веществ позволит снизить прочность мерзлых вскрышных пород и тем самым обеспечить возможность их безвзрывной разработки..

**Ключевые слова:** угольное месторождение, поверхностно-активные вещества, образцы пород, горные комбайны, безвзрывная технология, криолитозона

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №0297-2021-0020, №0297-2021-0021, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1, №122011800083-0) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант №13.ЦКП.21.0016.

**Для цитирования:** Хосоев Д.В., Киселев В.В. Влияние воздействий поверхностно-активных веществ на прочность образцов мерзлых вскрышных горных пород угольных месторождений криолитозоны. *Горная промышленность*. 2023;(6): 162–165. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-162-165>

## Effects of surfactant treatment on the strength of frozen overburden soil samples from coal deposits in the cryolithic zone

D.V. Hosoev✉, V.V. Kiselev

*Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk,  
Russian Federation  
✉ hosoev70@mail.ru*

**Abstract:** The harsh climatic conditions of the cryolithic zone with its long winter period and presence of permafrost soils significantly slow down all technological processes in surface mining. The resistance of frozen rocks at coal mines to digging with mining equipment can be reduced by their preliminary softening with the use of surfactants. The paper discusses the softening effect of aqueous surfactant solutions on samples of frozen overburden rocks. The authors demonstrate that treatment of rocks with solutions of optimal composition and concentration decreases their strength, which makes it possible to enhance the efficiency of In-Pit Crushing and Conveying Systems based on the rotary mechanical shovel in combination with a conveyor as well as the use of continuous miners. Experimental data are presented on the strength properties of artificially made samples

of overburden rocks from the Kangalassky coal deposit saturated with surfactant solutions of different concentrations. The authors point out that the highest decrease in the samples strength is achieved when using aqueous solution of aluminum chloride. The results of experiments carried out to establish the effects of distilled water (H<sub>2</sub>O) and NaCl solutions of different concentrations on the strength properties of fine-grained sandstones from the Elga coal deposit are presented, which confirm that at the temperature of -10°C the maximum reduction of up to 55% is achieved in the strength of the samples, and when the temperature decreases from -10°C to -20°C a slight increase is observed in the sample strength. The authors suggest that the use of surfactants will reduce the strength of the frozen overburden soils, thus making it possible to apply a blast-free mining technology.

**Keywords:** coal deposit, surfactants, rock samples, continuous miners, blast-free mining technology, cryolithic zone

**Acknowledgments:** The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No.0297-2021-0020, No.0297-2021-0021, EGISU NIOCTR No.122011800086-1, No.122011800083-0) using instruments that belong to the Shared core facilities of the Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Grant No.13.ЦКП.21.0016.

**For citation:** Hosoev D.V., Kiselev V.V. Effects of surfactant treatment on the strength of frozen overburden soil samples from coal deposits in the cryolithic zone. *Russian Mining Industry*. 2023;(6):162–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-162-165>

## Введение

В настоящее время значительное число угольных месторождений Якутии разрабатывается открытым способом с применением циклической технологии, автомобильного транспорта и буровзрывных работ, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду вредными выбросами. Одним из путей повышения рентабельности горнодобывающих предприятий является применение безвзрывных поточных технологий на базе роторно-конвейерных комплексов и горных комбайнов.

Большой рост сопротивления копанию при промерзании горных пород предопределяет необходимость их разупрочнения для ведения безвзрывной выемки. Эта проблема может быть решена применением поверхностно-активных веществ (ПАВ) [1–3].

В работе [4] приведены результаты исследований, проведенных с целью продления сезона работы роторных экскаваторов на разрезе путем снижения прочности мерзлого массива вскрышных пород химическими способами. При проведении эксперимента в породный массив с влажностью от 20 до 50% непосредственно перед его промерзанием вводили соляную кислоту концентрации 0,25–1,0 Н для интервала температур от -0,5 до -25°C. Как показали результаты выполненных экспериментальных исследований, прочность пород, находящихся в мерзлом состоянии, при этом снизилась на 40–50%.

В статье [5] приведены результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик мерзлых дисперсных грунтов (песок и суглинков) с добавлением ПАВ. В качестве ПАВ использовался поливиниловый спирт 2%-ной концентрации. Для определения значений прочности использовался метод шарикового штампа при воздействии постоянной нагрузки. Полученные данные позволили сделать вывод, что введение ПАВ оказывает разупрочняющее влияние на мерзлые грунты независимо от их типа. Кроме того, установлено, что изменение прочности мерзлых грунтов как песков, так и суглинков обусловлено структурными изменениями, происходящими при введении ПАВ.

Из химических способов разупрочнения грунтов наибольшее распространение получили способы, основанные на введении растворов хлористых солей [6]. Способы основаны на особенностях этих растворов размораживать

лед, содержащийся в порах мерзлого грунта, переводя таким образом его в пластическое состояние. В то же время отмечается, что недостатками данного способа являются: большая трудоемкость реализации, сложность и длительность осуществления процесса, высокая стоимость из-за необходимости использования больших объемов концентрированных растворов солей.

## Результаты и обсуждение

Ранее в ИГДС СО РАН были проведены исследования по определению прочности на сжатие замороженных образцов песчаников Кангаласского бурогоугольного месторождения, насыщенных рассолами минерализованных подземных вод кимберлитового карьера «Удачный» АК «АЛРОСА», имеющими температуру замерзания -20°C.

Были изготовлены образцы кубической формы размерами 50×50×50 мм с 50%-ным и 30%-ным содержанием рассола от общей влажности песчаника, а также образцы из песчаника с естественной влажностью. Исследования проводились при температурах от -5 до -40°C на испытательной машине UTS-250.

Полученные результаты показали, что при температуре образцов -40°C песчаник, насыщенный рассолом с содержанием до 50%, имеет  $\delta_{сж} = 0,761$  МПа, а 30%-ный состав при той же температуре достигает  $\delta_{сж} = 0,933$  МПа. При температурах замораживания от -5 до -30°C рассоломодержащие образцы практически не смерзаются. Таким образом, был сделан вывод, что при более высокопроцентном содержании рассола в образце существенно снижаются его прочностные характеристики.

Кроме этого, были проведены лабораторные исследования на искусственных образцах, изготовленных из вскрышных пород Кангаласского бурогоугольного месторождения, с использованием растворов ПАВ различной концентрации: карбоната натрия Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, хлорида натрия NaCl и водного раствора хлористого алюминия AlCl<sub>3</sub>×6H<sub>2</sub>O. Исследования проводились по стандартной методике определения прочности на одноосное сжатие (ГОСТ 21153.2–75) на 10 образцах кубической формы размером 5×5 см, при отрицательных температурах в диапазоне от -3 до -20 °C [7].

Анализируя результаты исследований, можно сделать вывод, что применение вышеприведенных растворов ПАВ

приводит к значительному снижению прочности образцов мерзлых дисперсных пород. При этом при повышении концентрации ПАВ снижение прочности образцов происходит более интенсивно, особенно в диапазоне невысоких отрицательных температур (от  $-3$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ ).

Наибольшее снижение прочности образцов отмечено при применении водного раствора хлористого алюминия  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Так, при его использовании в 3%-ной концентрации при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  их исходная прочность снижается в 4,5 раза, а при  $-20^{\circ}\text{C}$  в 1,7 раза, что в среднем в 1,2–2,7 раза выше в сравнении с использованием растворов хлорида натрия  $\text{NaCl}$  и карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  этой же концентрации.

В соответствии с разработанной методикой были также проведены эксперименты с целью установления зависимости влияния дистиллированной воды  $\text{H}_2\text{O}$  и растворов хлорида натрия  $\text{NaCl}$  различной концентрации на прочностные свойства мелкозернистых песчаников Эльгинского каменноугольного месторождения.

Определение показателей прочности на одноосное сжатие проводилось на гидравлическом прессе Toni NORM – 60 т. Для каждой серии экспериментов изготавливались пять-шесть образцов кубической формы размером  $4 \times 4$  см.

Исследования проводились при комнатной температуре ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) и при отрицательных температурах  $-5$ ,  $-10$  и  $-20^{\circ}\text{C}$  в воздушно-сухом состоянии, а также с использованием, как уже говорилось, дистиллированной воды  $\text{H}_2\text{O}$  и хлорида натрия  $\text{NaCl}$  различной концентрации 5, 10 и 20%.

В результате проведенных исследований установлено, что наиболее интенсивное разупрочнение образцов происходит в диапазоне температур от  $-5$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  с использованием 10%-ного  $\text{NaCl}$ . Максимальное снижение прочности образцов в 1,4–1,5 раза отмечено при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$  (рис. 1).

Было также подтверждено, что образцы в воздушно-сухом состоянии при различных отрицательных температурах имеют большую прочность, чем прочность, полученную при комнатной температуре. Так, при  $-5^{\circ}\text{C}$  она возросла с 79 до 104,7 МПа – на 25%, при  $-10^{\circ}\text{C}$  до 94,3 МПа – на 16% и при  $-20^{\circ}\text{C}$  до 108,6 МПа – на 27% [8]. В образцах, насыщенных дистиллированной водой, интенсивное замораживание происходило при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$ , а в насыщенных растворами солей диапазон температур интенсивных фазовых переходов смещается в зону более низких температур в зависимости от концентрации растворов.

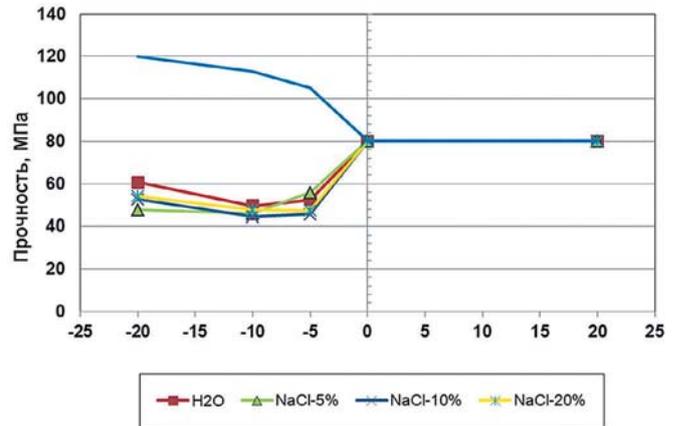


Рис. 1  
Изменение прочности образцов песчаников Эльгинского каменноугольного месторождения на одноосное сжатие при различных температурах

Fig. 1  
Variations in uniaxial compressive strength of sandstone samples from the Elga coal deposit at different temperatures

При дальнейшем понижении температуры образуемый поровый лед цементирует и упрочняет песчаник.

**Выводы**

Проведенные исследования показали, что воздействие водных растворов ПАВ на образцы мерзлых вскрышных горных пород приводит к снижению прочностных свойств, что позволяет в определенных пределах управлять их состоянием и свойствами.

Есть основание утверждать, что использование ПАВ позволит снизить прочность мерзлых вскрышных пород на угольных разрезах криолитозоны и тем самым обеспечить их безвзрывную разработку с применением современного горнодобычного оборудования непрерывного действия, повышая темп ведения горных работ. Наиболее перспективным в данных условиях является применение горных комбайнов типа WSM, KSM, Tesmec RH. Благодаря высокому значению развиваемых усилий резания эти машины могут успешно разрабатывать породы прочностью на сжатие до 60–80 МПа [9; 10].

**Список литературы**

- Норов Ю.Д., Мардонов У.М., Тошев О.Э. Изучение влияния водных растворов ПАВ на изменение прочности горного массива. *Горный журнал*. 2005;(3):15–16.
- Чебан А.Ю., Секисов А.Г., Рассказов М.И., Цой Д.И., Терешкина А.А. Повышение эффективности селективной выемки богатых руд путем их предварительного физико-химического разупрочнения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(9):29–41. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_9\\_0\\_29](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_29)
- Курилко А.С., Ермаков С.А., Хохолов Ю.А., Каймонов М.В., Бураков А.М. *Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке месторождений россыпей криолитозоны*. Новосибирск: Гео; 2011. 139 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-modelirovanie-teplovyyh-processov-v-gornom-massive-pri-otkrytoy-razrabotke-r.pdf>
- Шишкин Ю.П., Микелевич А.П., Бураков А.М. Экспериментальные исследования безвзрывного разупрочнения многолетнемерзлых пород на алмазоносном месторождении. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1990;(4):79–84.

5. Ефимов В.М., Кравцова О.Н., Степанов А.В., Тимофеев А.В., Васильчук Ю.К., Таппырова Н.И. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочность мерзлых грунтов криолитозоны Республики Саха (Якутия). *Арктика и Антарктика*. 2017;(4):80–85. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25035>
6. Черкашин В.А. *Разработка мерзлых грунтов*. Л.: Стройиздат; 1977. 215 с.
7. Хосоев Д.В. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочность мерзлых пород Кангаласского месторождения. *Горная промышленность*. 2013;(5):88.
8. Панишев С.А., Хосоев Д.В., Матвеев А.И. Повышение эффективности разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения Якутии путем их разупрочнения с использованием поверхностно-активных веществ. *Горная промышленность*. 2021;(1):98–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-98-104>
9. Малышев Ю.Н., Анистратов К.Ю. (ред.) *Мировая горная промышленность 2004–2005: история, достижения, производство*. М.: Горное дело; 2005. Т. 1. 376 с.
10. Флавио В. Горные комбайны Tesmec Rock Hawg безопасное и экологическое фрезерование. *Автосила*. 2021;(8). Режим доступа: <https://autosila24.ru/gortekh/85717-gornye-kombajny-tesmec-rock-hawg-bezopasnoe-i-ekologichnoe-poslojnoe-frezerovanie/>

## References

1. Norov Yu.D., Mardonov U.M., Toshev O.E. Studying the impact of aqueous surfactant solutions on changes in the rock mass strength. *Gornyi Zhurnal*. 2005;(3):15–16. (In Russ.)
2. Cheban A.Yu., Sekisov A.G., Rasskazov M.I., Tsoi D.I., Tereshkin A.A. Efficiency upgrading in selective mining of high-grade ore by means of preliminary physicochemical softening. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(9):29–41. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_9\\_0\\_29](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_29)
3. Kurilko A.S., Ermakov S.A., Khokholov Yu.A., Kaimonov M.V., Burakov A.M. *Modeling of thermal processes in the rock mass during open-pit mining of placer deposits in the cryolithic zone*. Novosibirsk: Geo; 2011. 139 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-modelirovanie-teplovyyh-processov-v-gornom-massive-pri-otkrytoy-razrabotke-r.pdf>
4. Shishkin Yu.P., Mikulevich A.P., Burakov A.M. Experimental studies of blast-free softening of perennially frozen rocks at a diamondiferous deposit. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1990;(4):79–84. (In Russ.)
5. Efimov V.M., Kravtsova O.N., Stepanov A.V., Timofeev A.V., Vasil'chuk Y.K., Tappyrova N.I. Research on the impact of the surface active agents upon the strength of the frozen soil of the cryolithozone of the Sakha Republic (Yakutia). *Arctic and Antarctica*. 2017;(4):80–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25035>
6. Cherkashin V.A. *Mining in frozen soils*. Leningrad: Stroyizdat; 1977. 215 p. (In Russ.)
7. Khosoev D.V. Research into the effect of surface active agents on the strength of frozen rocks of the Kangalasskoe deposit. *Russian Mining Industry*. 2013;(5):88.
8. Panishev S.V., Hosoev D.V., Matveev A.I. Enhancing efficiency of overburden removal and coal mining at Elginsky coal deposit in Yakutia by their softening with surfactants. *Russian Mining Industry*. 2021;(1):98–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-98-104>
9. Malyshev Yu.N., Anistratov K.Yu. (eds) *World Mining Industry 2004-2005: history, achievements, production*. Moscow: Gornoe delo; 2005. Vol. 1. 376 p. (In Russ.)
10. Flavio V. Tesmec Rock Hawg continuous miners: safe and environmentally friendly rock cutting. *Avtosila*. 2021;(8). (In Russ.) Available at: <https://autosila24.ru/gortekh/85717-gornye-kombajny-tesmec-rock-hawg-bezopasnoe-i-ekologichnoe-poslojnoe-frezerovanie/>

### Информация об авторах

**Хосоев Доржо Владимирович** – ведущий инженер, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: hosoev70@mail.ru

**Киселев Валерий Васильевич** – старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

### Information about the authors

**Dorzho V. Hosoev** – Leading Engineer, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: hosoev70@mail.ru

**Valery V. Kiselev** – Senior Researcher, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2023

Поступила после рецензирования: 24.10.2023

Принята к публикации: 03.11.2023

### Article info

Received: 15.09.2023

Revised: 24.10.2023

Accepted: 03.11.2023