

**К вопросу разупрочнения вскрышных пород
Эльгинского угольного месторождения
путем использования поверхностно-активных веществ**

Д.В. Хосоев*, А.И. Матвеев**

Институт горного дела севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия

**Hosoev70@mail.ru*

***andrei.mati@yandex.ru*

Аннотация. При безвзрывной разработке месторождения существенной проблемой является рост сопротивления копанью при промерзании пород и углей. С увеличением прочностных свойств горных пород производительность комбайна может резко уменьшиться, особенно при эксплуатации его в зимний период.

Расчетным путем определена степень влияния физико-механических свойств разных литологических составов горных пород Эльгинского месторождения на производительность комбайна КСМ-2000Р, так при крепости пород на сжатие до 40 МПа (угли и углистые алевролиты) производительность КСМ-2000Р составит 1400 м³/ч. При увеличении доли крепких компонентов до 40 % (в основном алевролиты) и крепости в горных породах от 40 до 60 МПа ожидаемое уменьшение производительности составит до 1000 м³/ч, а при содержании доли крепких пород от 60 до 80 МПа до 33 % – 650 м³/ч.

Предложено использование поверхностно-активного вещества – раствора NaCl для предварительного разупрочнения горных пород. После обработки данных пород ПАВ в условиях отрицательных температур до –20 °С $\sigma_{сж}$ снизилась на 30–50 %, а σ_p уменьшилась примерно на 50 % по всем видам и слоям слагающих пород. Отмеченное позволит обеспечить необходимые условия их безвзрывной разработке с применением комбайнов типа КСМ-2000Р.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, комбайн, прочность пород, производительность, образцы, растворы, песчаники, разупрочнение, безвзрывная технология.

Введение

В настоящее время идет интенсивное освоение одного из крупнейших на Северо-Востоке России Эльгинского угольного месторождения, характеризующегося сложными горно-геологическими и природно-климатическими условиями разработки. Углевмещающая толща месторождения суммарной мощностью около 200 м содержит 22 угольных пласта рабочей мощности. При этом около 75 % запасов месторождения приходится на четыре пласта У₅, У₄, Н₁₆ и Н₁₅, имеющих также сложное строение и включающих от 1–2 до 10–12 породных прослоев. По ряду пластов наблюдается расщепление на две или три самостоятельные пачки.

Вскрышные породы представлены двумя типами: рыхлыми четвертичными отложениями и коренными, отнесенными по крепости к породам средней крепости (полускальные).

Главным из факторов, оказывающих преимущественное влияние на эффективность и надежность эксплуатации горнодобычного оборудования, являются прочностные свойства экскавируемых пород, в том числе и в зимний период.

Перспективным в плане селективной разработки сложноструктурных пластов Эльгинского месторождения является применение комбайнов KSM (Виртген, КСМ-2000Р). Данные машины способны разрабатывать массивы горных пород с высокой селекцией тонких слоев без их

буровзрывной или механической подготовки к выемке [1–5].

Материалы

Производительность комбайнов КСМ при безвзрывной разработке во многом определяется конкретными горно-техническими условиями, а именно состоянием массива (трещиноватость, крупность отдельностей, структура), а также прочностью, вязкостью и абразивностью пород, слагающих массив. Так как указанные параметры

индивидуальны для каждого участка добычи, производительность может варьироваться.

В табл. 1 показано распределение вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения по пределу прочности на сжатие. Наибольшей прочностью обладают песчаники мелкозернистые, песчаники среднезернистые и алевролиты крупноалевролитовые – до 200 МПа. При этом большая часть коренных пород (72 % от общего объема пород по месторождению) имеет предел прочности на сжатие в диапазоне от 20 до 80 МПа.

Таблица 1

Распределение вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения по уровню значений предела прочности при сжатии и производительность комбайна КСМ-2000Р

Table 1

Distribution of bedrocks of the Elginskoye field by the level of values of ultimate strength in compression and productivity of the KSM-2000R combine

Литологический тип пород Lithological type of rocks	Распределение горных пород по прочности на сжатие МПа в % и производительность комбайна КСМ-2000Р Distribution of rocks by compressive strength MPa in % and productivity of the combine KSM-2000R									
	до 20	20–40	40–60	60–80	80–100	100–120	120–140	140–160	160–180	180–200
Песчаники к/з Sandstones k /z	–	20,2	26,6	13,3	20,0	6,6	13,3	–	–	–
Песчаники с/з Sandstones s /z	–	12,5	45,2	20,0	11,2	6,2	2,5	–	1,2	1,2
Песчаники м/з Sandstones m /z	–	15,1	38,5	21,3	15,6	4,6	1,0	1,4	1,0	1,5
Переслаивание песчаников и алевролитов Interlacing sandstones and alevrolites	–	6,8	23,9	32,6	15,2	8,6	4,3	6,5	2,1	–
Алевролиты к/а siltstones k/a	4,8	27,9	36,7	8,8	7,3	8,8	2,9	1,4	–	1,4
Алевролиты м/а Siltstones m/a	5,0	9,5	38,0	23,8	19,0	–	4,7	–	–	–
Алевролиты угл. Coal siltstones	16,8	66,6	–	–	–	–	–	–	–	–
Уголь Coal	90,0	10,0	–	–	–	–	–	–	–	–
Производительность КСМ-2000Р, м ³ /ч Performance KSM-2000R, m ³ /h	1400	1400	1000	650	380	320	250	200	170	140

Примечание. к/з – крупнозернистый, с/з – среднезернистый, м/з – мелкозернистый, к/а – крупноалевролитовый, м/а – мелкоалевролитовый.

Note. k/z – coarse-grained, s/z – medium-grained, m/z – fine-grained, k/a – coarse silt, m/a – fine-silt.

По прочностным свойствам пород Эльгинского месторождения выполнен расчет производительности комбайна КСМ-2000Р: производительность КСМ-2000Р по углю и углистым алевролитам составляет в плотном теле 1400 м³/ч, при крепости пород на сжатие до 40 МПа (17 % от общего объема пород по месторождению) – 1400 м³/ч, от 40 до 60 МПа (35 %) – 1000 м³/ч и от 60 до 80 МПа (20 %) – 650 м³/ч [6].

Таким образом, с увеличением прочностных свойств горных пород производительность комбайна может резко уменьшаться. Это особенно актуально при эксплуатации горнодобычного оборудования в зимний период.

Повышение производительности горных машин во многом связано с проблемой снижения энергоемкости процессов механического разрушения горных пород. При этом основные сложности с разработкой мерзлых грунтов в зимнее время связаны с самым верхним, деятельным слоем, разупрочнением которого можно обеспечить оптимальные условия для его разработки.

Перспективно разупрочнение с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые позволяют управлять свойствами и состоянием разрабатываемого горного массива. Растворы ПАВ активно проникают в трещины и на контакты минеральных зерен по механизму адсорбции, снижая поверхностную энергию горных пород (эффект Ребиндера). Эффективность действия ПАВ зависит от величины свободной поверхности трещин и межзеренных контактов в горном массиве.

ПАВ широко используются во многих областях промышленности, но в горном деле их применение носит весьма ограниченный характер. Немногочисленные работы в этом направлении (например, применение ПАВ в взрывных работах) не выходят, как правило, за рамки экспериментальных исследований [7–12].

Использование водных растворов ПАВ предполагает, что простота, безопасность, относительная дешевизна и полная экологическая чистота позволяют прогнозировать широкую перспективу их освоения в практике открытой угледобычи.

Даже относительно небольшое присутствие водных растворов в массиве крепких горных пород существенно сокращает износ режущего инструмента. Учитывая стоимость последнего, затраты на опережающую физико-химиче-

скую обработку горного массива представляются оправданными.

Методика

Для установления зависимости влияния ПАВ на прочностные свойства мелкозернистых песчаников Эльгинского месторождения и определения предела прочности на одноосное сжатие мы провели эксперименты.

Отбор проб произведен на первоочередном участке отработки Эльгинского месторождения из междупластья почвы пласта Н₁₆ и кровли пласта Н₁₅, горизонта 1065-1072.

Образцы для исследований выпиливались из девяти кусков камня (мелкозернистых песчаников) размерами примерно 200×200×110 мм.

Из каждого куска камня выпиливалось максимально возможное большое количество кубиков с ребром 40 мм. Всего было выпилено 98 кубиков, каждый образец был промаркирован в соответствии с номером камня (рис. 1). № 1 – 7 шт., № 2 – 18 шт., № 3 – 20 шт., № 4 – 8 шт., № 5 – 18 шт., № 6 – 8 шт., № 7 – 10, № 8 – 1 шт., № 9 – 8 шт.

Затем образцы высушиваются в сушильном шкафу в течение 8 ч при температуре 105 °С, после чего снова взвешиваются. Таким образом устанавливается естественное влагосодержание в воздушно-сухом состоянии.

Определение прочности на одноосное сжатие проводилось на гидравлическом прессе Топи NORM – 60 т (рис. 2).

В каждой серии экспериментов использовались пять–шесть образцов кубической формы



Рис. 1. Маркированные образцы песчаника в соответствии с номером камня.

Fig. 1. Marked sandstone samples in accordance with the stone number.



Рис. 2. Разрушение образца на гидравлическом прессе Toni NORM.

Fig. 2. Destruction of a sample on a Toni NORM hydraulic press.

размером 4×4 см. Исследования проводились при комнатной температуре (+20 °С) и при отрицательных температурах –5, –10 и –20 °С в воздушно-сухом состоянии, а также с использованием дистиллированной воды и хлорида натрия различной концентрации (NaCl 5, 10 и 20 %) (рис.3).

Проведенные эксперименты по разупрочнению песчаников Эльгинского месторождения позволили выделить по крепости две группы: первая – менее прочные образцы, изготовленные из камней № 1, 4, 5, 6, 7, 8 и 9, 2 и вторая – прочные образцы, изготовленные из камней № 2 и 3, крепость которых выше по сравнению с другими в 1,5–2 раза. Полученные прочностные данные образцов из второй группы имеют большой разброс, поэтому статистические данные менее достоверны.

Дальнейший анализ проводился по менее прочным образцам из первой группы. В табл. 2 показаны результаты статистической обработки проведенных экспериментов для первой группы образцов.

Как показали результаты статистической обработки, в большинстве случаев экспериментальные данные достоверны.

Обсуждение

Проведенные исследования показывают, что наибольшее снижение средней прочности образцов наблюдается при температуре –10 °С как в воздушно-сухом состоянии, так с использованием дистиллированной воды и хлорида натрия различной концентрации.



Рис. 3. Образцы в морозильной камере при –5 °С.

Fig. 3. Samples in a freezer at –5 °C.

Так при –10 °С наибольшие показатели средней прочности наблюдаются у образцов в воздушно-сухом состоянии – 94,3 МПа, а наименьшие – 47,6 МПа – при использовании 20%-го NaCl (рис. 4).

При понижении температуры с –10 °С до –20 °С наблюдается незначительное повышение прочности образцов: на 15 % без применения ПАВ, на 18 % с H₂O, на 4 % с NaCl 5 %, на 14 % с NaCl 10 % и на 12 % с NaCl 20 %. Это объясняется тем, что при более интенсивном замерзании пород происходит увеличение их прочностных свойств, и воздействие на них ПАВ заметно снижается.

Анализ полученных данных показывает, что образцы в воздушно-сухом состоянии при различных температурах имеют большую прочность, чем при комнатной температуре. Так при –5 °С их прочность растет с 79,6 до 104,7, на 25 %, при –10 °С – до 94,3 %, на 16 % и при –20 °С возрастает до 108,6, на 27 %.

При использовании дистиллированной воды и растворов NaCl различной концентрации прочность образцов по сравнению с прочностью образцов, испытанных при комнатной температуре, минимально снижается на 26 % максимально – на 45 %.

Таким образом, показано, что использование ПАВ позволяет снизить прочность мерзлых пород и тем самым дает основание для полноценного применения технологии безвзрывной разработки с применением комбайнов типа КСМ. При условии разупрочнения пород с прочностью на сжатие от 60 до 80 МПа за счет применения поверхностно активных веществ (ПАВ) производительность КСМ-2000Р может возрасти с 650 м³/ч до 1100 м³/ч (80 % паспортной).

Таблица 2

Статистическая достоверность результатов по сериям первой группы образцов

Table 2

Statistical reliability of the results for the series of the first group of samples

Статистические оценки Statistical estimates	При комнатной температуре At room temperature				
Среднее значение Mean	79,6				
Стандартное отклонение Standard deviation	16,4				
Коэффициент вариации The coefficient of variation	20,6				
Уровень доверия Trust level	0,9				
Достоверность среднего статистического значения Validity of the statistical mean	1,0				
–5 °C					
	Без ПАВ	H ₂ O	NaCl-5 %	NaCl-10 %	NaCl-20 %
Среднее значение Mean	104,7	52,4	55,8	45,4	47,3
Стандартное отклонение Standard deviation	11,5	13,0	16,2	5,9	2,0
Коэффициент вариации The coefficient of variation	10,7	24,8	29,0	13,0	4,2
Уровень доверия Trust level	1,0	0,8	0,68	1,0	1,0
Достоверность среднего статистического значения Validity of the statistical mean	Да	Да	Нет	Да	Да
–10 °C					
Среднее значение Mean	94,3	49,5	45,8	44,4	47,6
Стандартное отклонение Standard deviation	9,6	14,6	5,3	4,2	7,2
Коэффициент вариации The coefficient of variation	10,1	29,4	11,5	9,4	15,1
Уровень доверия Trust level	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0
Достоверность среднего статистического значения Validity of the statistical mean	Да	Нет	Да	Да	Да
–20 °C					
Среднее значение Mean	108,6	60,6	47,6	52,6	53,9
Стандартное отклонение Standard deviation	24,2	16,7	5,1	9,2	2,2
Коэффициент вариации The coefficient of variation	22,2	27,5	10,7	17,5	4,1

	Без ПАВ	H ₂ O	NaCl-5 %	NaCl-10 %	NaCl-20 %
Уровень доверия Trust level	0,9	0,7	1,0	1,0	1,0
Достоверность среднего статистического значения Validity of the statistical mean	Да	Нет	Да	Да	Да

Заключение

Экспериментальными исследованиями установлено существенное снижение прочности мерзлых пород при использовании поверхностно-активных веществ. А произведенные расчеты показывают возможность эффективного применения безвзрывной технологии добычи при использовании комбайнов типа КСМ-2000Р на Эльгинском месторождении.

Наиболее перспективным в данных условиях представляется применение комбайнов нового поколения типа VASM, WSM, KSM. Благодаря высоким значениям развиваемых усилий резания эти машины могут успешно разрабатывать породы прочностью на сжатие до 60–80 МПа.

Полученные результаты имеют важное значение для назначения технологических мероприятий по снижению прочности многолетнемерзлых горных пород и повышению эффективности их разработки.

Выводы

1. Установлены экспериментальные зависимости изменения прочности многолетнемерзлых пород при воздействии дистиллированной воды и NaCl различной концентрации в диапазо-

не отрицательных температур. Определено, что при температуре –10 °С достигается максимальное снижение прочности образцов до 55 %.

2. Образцы в воздушно-сухом состоянии при различных температурах имеют большую прочность, чем прочность, полученная при комнатной температуре. Так при –5 °С она возросла с 79,6 до 104,7 МПа, на 25 %, при –10 °С – до 94,3 МПа, на 16 %, и при –20 °С – до 108,6 МПа, на 27 %.

3. При понижении температуры с –10 до –20 °С наблюдается незначительное повышение прочности образцов: на 15 % в воздушно-сухом состоянии, на 18 % с H₂O, на 4 % с NaCl 5 %, на 14 % с NaCl 10 % и на 12 % с NaCl 10 %. Это объясняется тем, что при более интенсивном замерзании пород происходит увеличение их прочностных свойств, и воздействие на них ПАВ заметно снижается.

4. Среднестатистические значения, полученные в результате исследований образцов (меньшей крепости), в большинстве случаев являются достоверными.

5. Предварительная обработка горных пород растворами ПАВ дает основание для эффективного использования технологии безвзрывной, се-

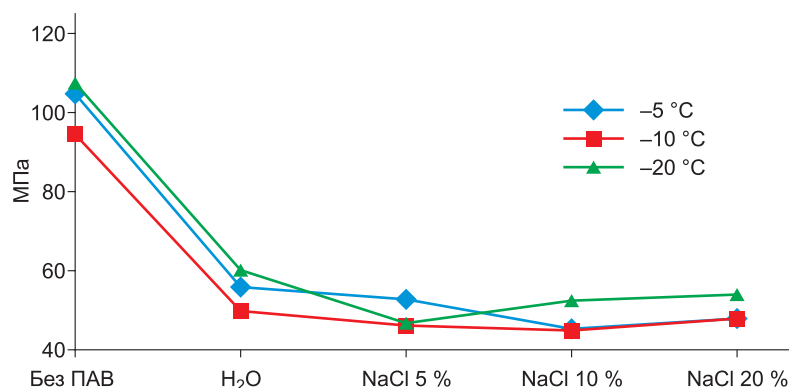


Рис. 4. Изменение прочности образцов.

Fig. 4. Change in the strength of samples.

лективной разработки угля из Эльгинского месторождения с использованием комбайнов типа КСМ-2000Р, что делает внедрение результатов данных исследований актуальным.

Литература

1. *Мировая горная промышленность. История. Достижения. Производство.* М.: НТЦ «Горное дело», 2005. 250 с.
2. *Грбский А.А.* Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов // *Горная пром-сть.* 2010. № 4. С. 60.
3. *Винницкий К.В.* О перспективах применения машин типа КСМ на открытых горных разработках // *Горн. информ.-анал. бюл.* 1998. № 4. С. 173.
4. *Ермаков С.А.* Оценка эффективности применения комбайнов Wirtgen на Эльгинском каменноугольном месторождении // *Горная пром-сть.* 2018. № 6. С. 77–79.
5. *Краснянский Г.Л.* Опыт создания и перспективы освоения в горнодобывающей промышленности машин нового поколения КСМ-2000РМ / Г.Л. Краснянский, Р.М. Штенцайг, В. Рудольф, С.К. Коваленко // *Уголь.* 1998. № 4. С. 16–21.
6. *Хосоев Д.В.* Оценка технологии разработки Эльгинского угольного месторождения / Д.В. Хосоев., С.А. Ермаков // *Уголь* – 2009. № 11. С. 9–12.
7. *Анистратов Ю.И. и др.* Перспективы расширения сферы применения безвзрывных технологий в открытой угледобыче // *Горная промышленность.* 1998. № 2. С. 14–19.
8. *Норов Ю.Д.* Изучение влияния водных растворов ПАВ на изменение прочности горного массива / Норов Ю.Д., Мардонов У.М., Тошев О.Э. // *Горный журнал.* 2005. № 3. С. 15.
9. *Латышев О.Г., Жилин А.С., Осипов И.С., Сынбулатов В.В.* Выбор поверхностно-активной среды для управления свойствами пород в горной технологии // *Горный журнал.* 2004. № 6. С. 117.
10. *Латышев О.Г.* Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. С. 660.
11. *Патент № 2012790 / Штеле В.И.* Способы разупрочнения горных пород.
12. *Шишкин Ю.П.* Экспериментальные исследования безвзрывного разупрочнения многолетнемерзлых пород на алмазном месторождении // *Шишкин Ю.П., Микулевич А.П., Бураков А.М./ Физико-технические проблемы.* 1990. № 5.

Поступила в редакцию 04.06.2020
Принята к публикации 15.12.2020

Об авторах

ХОСОЕВ Доржо Владимирович, ведущий инженер, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43,
<https://orcid.org/0000-0002-1466-8509>, hosoev70@mail.ru;

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич, главный научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43,
<https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, andrei.mati@yandex.ru.

Информация для цитирования

Хосоев Д.В., Матвеев А.И. К вопросу разупрочнения вскрышных пород Эльгинского угольного месторождения путем использования поверхностно-активных веществ // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики.* 2021. Т. 26, № 1. С. 70–77. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-7>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-1-7

Improving the efficiency of development of overburden rocks and coals of the Elgin Deposit of Yakutia by softening them using surfactants

D.V. Khosoev*, A. I. Matveev**

N.V. Chersky Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk, Russia

**Hosoev70@mail.ru*

***andrei.mati@yandex.ru*

Abstract. A significant problem for non-explosive development of a deposit is an increase in resistance to digging when rocks and coal freeze. With an increase in the strength properties of rocks, the performance of combines may sharply decrease, especially when operating in winter.

The degree to which the physical and mechanical properties of different lithological compositions of rocks in the Elga deposit affect the productivity of KSM-2000R combine was determined through calculation. For the compression strength of rocks up to 40 MPa, which includes coals and carbonaceous siltstones, the productivity of KSM-2000R will be 1400 m³/h. With an increase in the content of hard components in rocks from 40 to 60 MPa to 40 % (mainly siltstones), the expected decrease in productivity will be up to 1000 m³/h, and for the content of hard rocks from 60 to 80 MPa to 33 % – 650 m³/h. It is proposed to use a surfactant – NaCl solution for preliminary softening of the rocks. After processing these rocks with surfactants under negative temperatures down to –20 degrees, σ decreased by 30–50 %, and σ_r decreased by about 50 % for all types and layers of constituent rocks, which will ensure the necessary conditions for their explosive-free development using KSM 2000R type combines.

Key words: permafrost rocks, combine, rock strength, productivity, samples, solutions, sandstones, softening, non-explosive technology.

References

1. *Mirovaia gornaia promyshlennost. Istoriia. Dostizheniia. Proizvodstvo.* M.: Gornoe delo, 2005. 250 p.
2. *Grabskiy A.A. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiia konstruktssii kar'ernykh kombainov* // Gornaja prom-st. 2010. No. 4. P. 60.
3. *Vinnitskiy K.E. O perspektivakh primeneniia mashin tipa KSM na otkrytykh gornykh razrabotkakh* // Gorn. inform.-anal. bul. 1998. No. 4 P. 173.
4. *Ermakov S.A. Otsenka effektivnosti primeneniia kombainov Wirtgen na Elginskom kamennougolnom mestorozhdenii* // Gornaja prom-st. 2018. No. P. 77–99.
5. *Opyt sozdaniia i perspektivy osvoeniia v gornodobyvaiushchei promyshlennosti mashin novogo pokoleniia KSM-2000RM* / G.L. Krasnianskii, R.M. Shteintsaig, V. Rudolf, S.K. Kovalenko // Ugol. 1998. No. 4. P. 16–21.
6. *Otsenka tekhnologii razrabotki Elginskogo ugolnogo mestorozhdeniia* / D.V. Khosoev., S.A. Ermakov // Ugol. 2009. No. 11. P. 9–12.
7. *Anistratov Iu.I. i dr. Perspektivy rasshireniia sfery primeneniia bezvzryvnykh tekhnologii v otkrytoi ugledobyche* // Gornaia promyshlennost. 1998. No. 2. P. 14–19.
8. *Izuchenie vliianiia vodnykh rastvorov PAV na izmenenie prochnosti gornogo massiva* / Norov Iu.D., Mardonov U.M., Toshev O.E. // Gornyi zhurnal. 2005. No. 3. P. 15.
9. *Latyshev O.G., Zhilin A.S., Osipov I.S., Synbulatov V.V. Vybor poverkhnostno-aktivnoi sredy dlia upravleniia svoistvami porod v gornoj tekhnologii* // Gornyi zhurnal. 2004. No. 6. P. 117.
10. *Latyshev O. G. Razrushenie gornykh porod.* M.: Teplotekhnika, 2007. P. 660.
11. *Patent No. 2012790* // Shtelev V.I. Sposoby razuprochneniia gornykh porod.
12. *Eksperimentalnye issledovaniia bezvzryvnogo razuprochneniia mnogoletnemerzlykh porod na almaznom mestorozhdenii* / Shishkin Iu.P., Mikulevich A.P., Burakov A.M // Fiziko-tekhnicheskie problemy. 1990. No. 5.

About the authors

KHOSOEV Dorzho Vladimirovich, leading engineer, N.V. Chersky Mining Institute of the North SB RAS, 43 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia.

<https://orcid.org/0000-0002-1466-8509>, hosoev70@mail.ru;

MATVEEV Andrey Innokentievich, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), chief researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North SB RAS, 43 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-4298-5990> andrei.mati@yandex.ru.

Citation

Khosoev D.V., Matveev A.I. Improving the efficiency of development of overburden rocks and coals of the Elgin Deposit of Yakutia by softening them using surfactants // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 1. pp. 70–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-7>