

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЕКТИВНОЙ ВЫЕМКИ БОГАТЫХ РУД ПУТЕМ ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ

А.Ю. Чебан<sup>1</sup>, А.Г. Секисов<sup>1</sup>, М.И. Рассказов<sup>1</sup>, Д.И. Цой<sup>1</sup>, А.А. Терешкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия,  
e-mail: chebanay@mail.ru

**Аннотация:** Приведены анализ данных по использованию растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) в горном производстве и результаты собственных экспериментальных исследований по разупрочнению образцов скальных пород с определением их прочности при одноосном сжатии и растяжении. Пропитка образцов скальных пород средней трудности разрушения водным раствором ПАВ показала снижение их прочности на одноосное сжатие на 21–42% и на одноосное растяжение на 26–41%; подобное снижение прочностных характеристик после пропитки водным раствором ПАВ позволяет перевести данные горные породы в класс легко разрушаемых скальных. Предложена усовершенствованная технология разработки с выемкой локальных участков особо богатых руд сложноструктурных месторождений, обеспечивающая повышение точности оконтуривания и увеличения полноты извлечения особо богатых руд. Контуры особо богатых руд уточняются посредством сгущения сети скважин малого диаметра при выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента, в дальнейшем данные скважины используются для разупрочнения локальной зоны массива путем заполнения их водным раствором ПАВ. Опережающее рыхление и выемку локальных разупрочненных участков особо богатых руд предлагается осуществлять одноковшовым экскаватором, оснащенный сменным оборудованием в виде гидравлического молота и гидравлического грейфера. Высокий уровень селективной выемки особо богатых руд увеличит извлечение высокоценных металлов при последующей переработке сырья.

**Ключевые слова:** особо богатые руды, поверхностно-активные вещества, предварительное разупрочнение, физико-механические свойства, паспорт прочности, гидравлический молот, грейфер, опережающая выемка.

**Благодарность:** Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

**Для цитирования:** Чебан А. Ю., Секисов А. Г., Рассказов М. И., Цой Д. И., Терешкин А. А. Повышение эффективности селективной выемки богатых руд путем их предварительно физико-химического разупрочнения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 29–41. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_29.

---

## Efficiency upgrading in selective mining of high-grade ore by means of preliminary physicochemical softening

Cheban A.Yu.<sup>1</sup>, A.G. Sekisov<sup>1</sup>, M.I. Rasskazov<sup>1</sup>, D.I. Tsoi<sup>1</sup>, A.A. Tereshkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, e-mail: chebanay@mail.ru

---

**Abstract:** The article analyzes the data on using surface active substances (SAS) in mining and the testing results on softening of high strength rocks with determination of their strength in uniaxial compression and tension. After saturation of high-strength rocks of medium fracturability with aqueous solutions of SAS, the uniaxial compression strength and uniaxial tension strength of these rocks decreased by 21–42% and by 26–41%, respectively. Such reduction in the strength of rocks after saturation with SAS solutions allows putting the treated rocks in the class of easily fracturable high-strength rocks. The authors propose an improved mining technology for local areas of exceptionally high-grade ore from structurally complex deposits. This technology ensures better accuracy of delineation of exceptionally high-grade ore areas and higher completeness of their extraction. The outlines of the exceptionally high-grade ore areas are refined by densening of small-diameter well patterns in the zones with the revealed high content of the useful component. Later on these wells are used for softening the local areas by filling aqueous solution of SAS in them. Advanced ripping and extraction of the softened local areas containing exceptionally high-grade ore can use a single-bucket excavator with changeable hydraulic hammer and a hydraulic grabbing excavator. High selectivity of exceptionally high-grade ore mining can increase high-value metal recovery in the further mineral processing.

**Key words:** exceptionally high-grade ore, surface active substances, preliminary softening, physical and mechanical properties, failure envelope, hydraulic hammer, grabbing excavator, advanced extraction.

**Acknowledgements:** The studies used resources of the Shared Use Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Project No. 075-15-2021-663.

**For citation:** 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. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(9):29-41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_29.

---

### Введение

Развитие открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых на современном этапе должно сопровождаться комплексным решением вопросов последовательности выемки, ресурсосбережения и малоотходности, снижения энергоемкости процессов горных работ и уменьшения их отрицательного воздействия на окружающую

среду [1 – 3]. Также эффективное освоение месторождений полезных ископаемых возможно на основе достоверной информации о горно-геологических и горнотехнических условиях разработки [4 – 6]. При обосновании порядка и технологии вскрытия и отработки месторождения, определении параметров системы разработки важное значение имеют данные о физико-механических

свойствах горных пород, к числу которых относятся прочностные и упругие свойства, а также ряд других параметров [7–9].

Механическое рыхление и (или) выемку полускальных и легко разрабатываемых скальных пород с прочностью на сжатие до 50–80 МПа могут успешно вести бульдозерно-рыхлительные агрегаты, горные комбайны различных конструкций, фрезерные машины, одноковшовые экскаваторы со специальным оборудованием в виде ковшей активного действия, гидравлических молотов или гидравлических рыхлителей [10–13]. При работе с более прочными породами эффективность механической выемки существенно снижается, в результате чего более предпочтительными становятся технологические схемы с применением взрывного рыхления массива. В настоящее время имеется тенденция к расширению области использования безвзрывных технологий, это связано как с социальными и экологическими ограничениями на ведение взрывных работ, так и с необходимостью обеспечения высокоселективной выемки на сложноструктурных месторождениях полезных ископаемых, а также сохранения природного качества минерального сырья [12]. Возможность эффективного массового безвзрывного разрушения пород прочностью на сжатие 80–100 МПа и более может быть достигнута двумя путями: во-первых, за счет совершенствования существующих и создания новых рабочих органов рыхлительных и выемочных машин, а также увеличения их мощности; во-вторых, путем предварительной подготовки (разупрочнения) горных пород перед выемкой.

### **Разупрочнение горных пород**

Известны различные группы способов разупрочнения прочных и мерзлых

пород: термические, электрофизические, физико-химические, комбинированные [14]. Среди физико-химических способов разупрочнения наибольшего внимания заслуживает способ с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ), который заключается в предварительной обработке (пропитке) горных пород специальными водными растворами на основе ПАВ и солей. Применение растворов ПАВ позволяет повысить эффективность процессов горных технологий, связанных с разрушением горных пород. Молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности разрушаемой породы, понижая поверхностную энергию и оказывая влияние на ее механические характеристики.

Действие поверхностно-активной среды сопровождается снижением прочности скальных пород до 30...70%, уменьшением модуля и предела упругости в среднем в 1,3...1,5 раза [15]. Известен ряд исследований по применению растворов ПАВ для разупрочнения различных горных пород, преимущественно полускальных и легко разрабатываемых скальных, таких как кимберлиты, конгломераты, песчаники, аргиллиты, известняки и др. [15–19]. Так, в работе [17] выявлено, что при пропитке в течение двух суток образцов скальных вскрышных пород Эльгинского угольного месторождения растворами ПАВ в условиях отрицательных температур прочность пород на сжатие снизилась на 30...50%, а прочность на растяжение уменьшилась примерно на 50% по всем породам. На Талдинском угольном месторождении при пропитке массива раствором ПАВ через сеть скважин 1,3×1,3 м в течение двух суток прочность на сжатие снизилась у аргиллитов и алевролитов с 90 до 70 МПа, а у мелкозернистых песчаников — с 93 до 60 МПа [19]. Разупрочненные вскрышные породы предлагалось разрабатывать

с помощью карьерных комбайнов типа КСМ. Исследования по разупрочнению кимберлитов растворами ПАВ показали снижение прочности на сжатие примерно на 50%, что позволяет существенно повысить эффективность их механической разработки горными комбайнами или гидравлическими экскаваторами [20–21].

В целом исследования подтверждают, что обработка горных пород растворами ПАВ позволяет существенно снизить прочностные характеристики пород, сократить выход пыли при их разрушении, уменьшить износ бурового инструмента [15]. Недостатком предлагаемых технологий является необходимость бурения специальной сгущенной сети скважин для пропитки массива раствором ПАВ.

Согласно классификации академика В.В. Ржевского, по трудности разрушения горных породы подразделяются на пять классов [29]:

I класс — полускальные, плотные и мягкие породы;

II класс — легко разрушаемые скальные породы (известняки, доломиты, фосфориты, апатито-нефелиновая руда, скарны, алевролиты и др.);

III класс — скальные породы средней трудности разрушения (кварциты, порфириды, березиты, песчаники оруденелье и др.);

IV класс — трудноразрушаемые скальные породы (андезитовые порфириды, роговики, диорит-порфириды, скарны окремненные и др.).

V класс — весьма трудноразрушаемые скальные породы (микрокварциты очень плотные сливные, джеспилиты, базальты и др.).

В настоящее время предварительно разупрочнению с применением растворов ПАВ перед массовой выемкой подвергаются преимущественно породы II класса по трудности разрушения.

Металлорудные месторождения преимущественно сложены скальными породами III–V классов по трудности разрушения, поэтому их массовое механическое рыхление при нынешнем развитии технических средств даже после предварительного разупрочнения невозможно с требуемой производительностью и экономически нецелесообразно в сравнении с взрывным рыхлением.

Вместе с тем, разработка сложноструктурных рудных месторождений с применением буровзрывных работ ведет к разубоживанию и пересортице руд, продуцированию значительного количества шлама, что в дальнейшем снижает эффективность переработки руд, уменьшает общее извлечение металла [22]. В этом контексте механическая выемка локальных участков особо богатых руд экономически может быть вполне оправданна. Участки особо богатых и богатых руд при относительно небольших объемах в ряде случаев содержат основные запасы месторождений благородных и цветных металлов. Так, согласно работе [23], на одном из золото-медных месторождений скарнового типа в богатой руде, составляющей 13,12% объема со средним содержанием золота 18,6 г/т содержится 70,73% запасов золота, в том числе в 1,21% особо богатой руды с содержанием более 100 г/т содержится 35,65% запасов золота.

Добытая селективно особо богатая руда может быть направлена на автоклавное выщелачивание, которое обеспечит наиболее высокие показатели извлечения металла.

В работе [24] предлагается технология разработки сложноструктурных месторождений, заключающаяся в оконтуривании руд по сортам по данным сопровождающей разведки с выделением особо богатых, богатых, рядовых и бедных руд, выбурировании буровым агрегатом с расширителем зоны особо богатых

руд с предварительным локальным ослаблением руды раствором ПАВ. После опережающей механической выемки производится обустройство по частой сети зоны богатых руд шпурами или скважинами малого диаметра для получения при взрывании мелкокусковой рудной массы и подготовки остальной части выемочного блока с применением обычных параметров буровзрывных работ. Недостатками данной технологической схемы является то, что в процессе сопровождающей разведки при бурении взрывных скважин на основе анализа шлама не производится уточнения контуров зон особо богатых руд, а в процессе выбуривания производится расширение скважины с получением выработки круглой формы, которая может не соответствовать реальным контурам зоны особо богатых руд, что не позволит селективно извлечь весь объем особо богатой руды.

Целью работы является исследование эффективности разупрочнения растворами ПАВ скальных пород средней трудности разрушения и трудноразрушаемых, а также разработка усовершенствованной технологии выемки локальных участков особо богатых руд механическим способом.

## Методы и результаты исследований

Исследование прочностных характеристик проводилось на образцах горных пород одного из золоторудных месторождений Забайкальского края. Определение предела прочности пород производилось в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 методом одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими плитами. Настоящий стандарт распространяется на скальные и полускальные горные породы.

Для получения надежных значений достаточной является выборка из 6–10 образцов каждого типа пород. С целью определения прочности на одноосное сжатие пород были подготовлены цилиндрические образцы с параллельными торцами и отношением высоты к диаметру, равным двум, вырезанных из геологоразведочных кернов диаметром 63 мм. Образец размещался между стальными плитами, совмещая ось образца с центром нижней опорной плиты испытательной машины ToniPACT II (Германия) и нагружался до разрушения с равномерной скоростью (рис. 1). Образцы пород нагружали с равномерной скоростью 3 МПа/с [25]. Проводилось испытание образцов, находящихся как

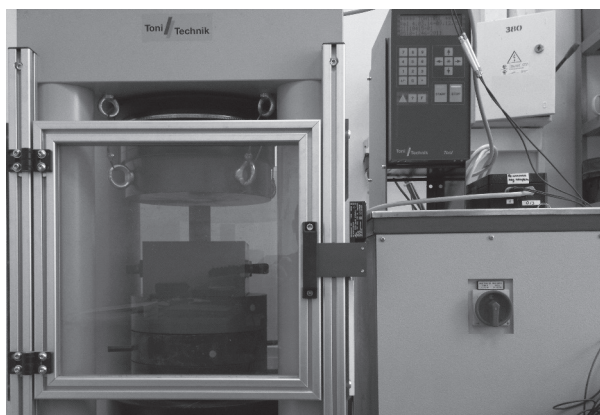


Рис. 1. Размещение образца между плитами испытательной машины ToniPACT II  
Fig. 1. Sample between plates of testing machine ToniPACT II

Таблица 1

**Результаты определения предела прочности образцов руд при одноосном сжатии**  
**Test results of ultimate uniaxial compression strength of ore samples**

| Горная порода                     | В естественном состоянии |                | После обработки раствором ПАВ |                |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
|                                   | число образцов           | прочность, МПа | число образцов                | прочность, МПа |
| Роговики                          | 8                        | 180,8          | 7                             | 157,4          |
| Березиты                          | 9                        | 135,3          | 8                             | 91,4           |
| Кварц-гидрослюдистые метасоматиты | 9                        | 107,9          | 7                             | 62,3           |
| Хлориты                           | 9                        | 99,3           | 7                             | 78,2           |

в естественном состоянии, так и после пропитки в водном растворе ПАВ в течение 48 ч. Из-за высокой трещиноватости и наличия неоднородностей не-



Рис. 2. Размещение образца между сферическими инденторами испытательной машины ToniNORM  
 Fig. 2. Sample between spherical indenters of testing machine ToniNORM

Таблица 2

**Результаты определения предела прочности образцов руд при одноосном растяжении**  
**Test results of ultimate uniaxial tension strengths of ore samples**

| Горная порода                     | В естественном состоянии |                | После обработки раствором ПАВ |                |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
|                                   | число образцов           | прочность, МПа | число образцов                | прочность, МПа |
| Роговики                          | 9                        | 5,50           | 7                             | 5,38           |
| Березиты                          | 9                        | 5,03           | 7                             | 3,69           |
| Кварц-гидрослюдистые метасоматиты | 9                        | 6,12           | 8                             | 3,62           |
| Хлориты                           | 9                        | 5,63           | 8                             | 3,79           |

которые образцы были отбракованы в процессе испытаний.

Процесс обработки результатов испытаний выборки образцов включал в себя: вычисление среднего арифметического значения предела прочности при одноосном сжатии, вычисление среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации. Результаты определения прочности пород при одноосном сжатии приведены в табл. 1.

Пропитка образцов руд водным раствором ПАВ привела к снижению их прочности на одноосное сжатие; так, прочность березитов снизилась на 32,4%, кварц-гидрослюдистых метасоматитов – на 42,3%, хлоритов – на 21,2%.

Определение предела прочности пород на одноосное растяжение производилось в соответствии с ГОСТ 21153.3-85 на образцах правильной формы сферическими инденторами. Испытания предела прочности на одноосное растя-

жение проводилось на установке Toni-NORM (Германия) (рис. 2).

Образцы нагружали до разрушения равномерно со скоростью 1 кН/с. Испытание признавалось действительным при разрыве образца на две части по поверхности, проходящей через ось нагружения, далее определялась величина площади поверхности разрыва образца в квадратных сантиметрах, после чего определялся предел прочности при одноосном растяжении (табл. 2). Разрушенные в ходе испытаний на сжатие и растяжение образцы представлены на рис. 3.

Пропитка образцов руд водным раствором ПАВ привела к снижению их прочности на одноосное растяжение; так, прочность березитов снизилась на 26,4%, кварц-гидрослюдистых метасоматитов — на 40,8%, хлоритов — на 32,7%.

Таблица 3

**Результаты построения паспорта прочности по данным определения предела прочности на сжатие и растяжение**

**Failure envelope plotted by test data on ultimate uniaxial compression and tension strengths**

| Наименование пород                   | Предел прочности, МПа |            | $\sigma_{сж} / \sigma_p$ | Паспорт прочности по ГОСТ 21153.8-88 |  |                          |  |
|--------------------------------------|-----------------------|------------|--------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|--|
|                                      | при растяжении        | при сжатии |                          | $\sigma_N = 0$                       |  | $\sigma_N = \sigma_{сж}$ |  |
|                                      |                       |            |                          | сцепление, МПа                       | угол внутреннего трения $\varphi$ , гр | сцепление, МПа           | угол внутреннего трения $\varphi$ , гр |
| <b>В естественном состоянии</b>      |                       |            |                          |                                      |  |                          |  |
| Роговики                             | 5,50                  | 180,8      | 32,9                     | 17,5                                 | 67,4                                   | 68,2                     | 44,5                                   |
| Березиты                             | 5,03                  | 135,3      | 26,9                     | 15,2                                 | 66,2                                   | 52                       | 44,3                                   |
| Кварц-гидрослюдистые метасоматиты    | 6,12                  | 107,9      | 17,6                     | 15,8                                 | 62,7                                   | 42,9                     | 42,1                                   |
| Хлориты                              | 5,63                  | 99,3       | 17,6                     | 14,5                                 | 62,7                                   | 39,5                     | 42,2                                   |
| Андезитовые порфириды                | 7,82                  | 197,0      | 25,2                     | 23,5                                 | 66,1                                   | 77,4                     | 44,6                                   |
| <b>После обработки раствором ПАВ</b> |                       |            |                          |                                      |  |                          |  |
| Роговики                             | 5,38                  | 157,4      | 29,3                     | 16                                   | 65,2                                   | 57,7                     | 43,4                                   |
| Березиты                             | 3,69                  | 91,4       | 24,8                     | 11                                   | 66,1                                   | 36,1                     | 44,6                                   |
| Кварц-гидрослюдистые метасоматиты    | 3,62                  | 62,3       | 17,2                     | 9,2                                  | 62,4                                   | 24,7                     | 41,8                                   |
| Хлориты                              | 3,79                  | 78,2       | 20,6                     | 10,6                                 | 64,7                                   | 31,4                     | 43,8                                   |
| Андезитовые порфириды                | 6,98                  | 135,9      | 19,5                     | 19                                   | 64                                     | 54,4                     | 43,3                                   |

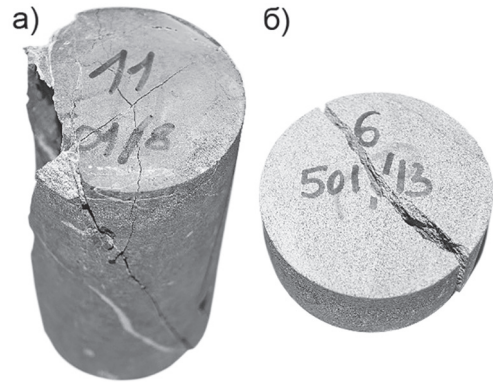


Рис. 3. Образцы горных пород после разрушения: при одноосном сжатии (а); при одноосном растяжении (б)

Fig. 3. Rock samples after fracture: uniaxial compression (a); uniaxial tension (b)

Наименьшее изменение физико-механических свойств было выявлено у роговиков, у которых прочность на одно-

осное сжатие снизилась на 12,9%, а на одноосное растяжение — на 2,2%.

Также были проведены аналогичные экспериментальные исследования по разупрочнению андезитовых порфиритов, являющихся одними из вмещающих пород месторождения, водным раствором ПАВ. Прочность андезитовых порфиритов на одноосное сжатие снизилась на 31,0%, с 197,0 до 135,9 МПа, а на одноосное растяжение — на 10,7%, с 7,82 до 6,98 МПа.

На основании полученных экспериментальных данных по прочности исследуемых пород при одноосном сжатии и растяжении был построен паспорт прочности пород, определены сцепление и угол внутреннего трения. Паспорт прочности рассчитывался согласно ГОСТ 21153.8-88 в соответствии с приложением «Расчетный метод построения паспорта прочности по данным определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении».

Метод предусматривает определение координат точек огибающей расчетным путем по эмпирическому уравнению с использованием данных определения пределов прочности при одноосном сжатии и при одноосном растяжении [26 — 27].

Итоговые результаты построения паспорта прочности с определением сцепления и угла внутреннего трения пород в естественном состоянии и пород после обработки раствором ПАВ приведены в табл. 3.

Укрупненные расчеты показывают возможность обеспечения необходимого запаса устойчивости вертикальных бортов выработки при локальной механической опережающей селективной выемке разупрочненных руд на высоту разрабатываемого уступа.

### **Предлагаемое решение**

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается усовершенствованная тех-

нология разработки с выемкой локальных участков особо богатых руд сложноструктурных месторождений, обеспечивающая повышение точности оконтуривания и увеличения полноты извлечения особо богатых руд. В процессе сопровождающей разведки при выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента осуществляется вторая стадия сопровождающей разведки, со сгущением сети скважин (меньшего диаметра), на основании данных которых производится оконтуривание включений богатых и особо богатых руд в плане. Полученная сгущенная сеть скважин в дальнейшем используется для пропитки массива водным раствором ПАВ, таким образом, пробуренные скважины малого диаметра имеют двойное назначение. Опережающее рыхление и выемку локальных участков особо богатых руд предлагается осуществлять гидравлическим одноковшовым экскаватором, оснащенным сменным оборудованием в виде гидравлического молота и гидравлического грейферного ковша.

Известна технологическая схема разработки сложноструктурных месторождений особо ценных полезных ископаемых с применением гидравлических молотов с верхней постановкой экскаватора; в сравнении с буровзрывной технологией такая схема позволяет сократить эксплуатационные потери при выемке руды в 2,5 — 3 раза [12]. Грейферное оборудование обеспечивает возможность селективной выемки в стесненных условиях предварительно разрыхленных горных пород [28]. Исследования [12] показывают, что при одной и той же энергии удара, при снижении прочности породы на 25 — 35% со 100 — 140 МПа до 80 — 100 МПа производительность гидравлического молота возрастает в 1,6 — 2,0 раза. Таким образом, предлагаемая усовершенствованная технология с комбинированной подготов-



кой пород позволит вести относительно эффективное механическое рыхление скальных пород средней трудности разрушения.

Гидравлический молот обеспечивает отбойку особо богатых руд по границам выявленного контура с минимальной пересортицей. После разрыхления слоя руды гидравлический молот посредством специального быстросъемного адаптера заменяется на гидравлический грейфер, которым осуществляется черпание рудной массы из полученной выработки. Селективно извлеченная особо богатая руда направляется на отдельную переработку.

### **Заключение**

Пропитка образцов скальных пород средней трудности разрушения — березитов, кварц-гидрослюдистых метасоматитов и хлоритов — водным раствором ПАВ показала снижение их прочности на одноосное сжатие на 21 — 42% и на одноосное растяжение на 26 — 41%, при этом наибольший эффект достигнут

при разупрочнении кварц-гидрослюдистых метасоматитов. Подобное снижение прочностных характеристик после пропитки водным раствором ПАВ позволяет перевести данные породы в класс легко разрушаемых скальных. Предлагаемая усовершенствованная технология разработки сложноструктурных месторождений позволяет уточнять контуры особо богатых руд посредством сгущения сети скважин малого диаметра при выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента, в дальнейшем данные скважины используются для разупрочнения локальной зоны массива путем заполнения их водным раствором ПАВ. Снижение прочности руд обеспечивает существенное повышение производительности их рыхления, а также позволяет применить с большей эффективностью гидравлический молот в комплексе с гидравлическим грейфером при высоком уровне селективной выемки особо богатых руд, что увеличит извлечение высокоценных металлов при последующей переработке сырья.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ческидов В. И., Норри В. К., Зайцев Г. Д., Ботвинник А. А., Бобыльский А. С., Резник А. В. Повышение эффективности технологий открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 5. — С. 107 — 122.

2. Afum B. O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit — underground mining options and transitions // International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2019, vol. 34, no. 10, pp. 700 — 724. DOI: 10.1080/17480930.2019.1701968.

3. Секисов Г. В., Чебан А. Ю. Малоотходная технология освоения сложноструктурных месторождений с применением комбинированных схем выемки и переработки руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 6. — С. 110 — 118. DOI: 10.15372/FTPRPI20210610.

4. Марчевская В. В., Мухина Т. Н. Физико-механические характеристики малосульфидных руд Кольского полуострова // Обогащение руд. — 2014. — № 6. — С. 56 — 60.

5. Zhang Z.-X., Hou D.-F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production // International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 670 — 691. DOI: 10.1080/17480930.2021.1949878.

6. Burkhardt M., Kim E., Nelson P. P. EMI database analysis focusing on relationship between density and mechanical properties of sedimentary rocks // Geomechanics and Engineering. 2018, vol. 14, no. 5, pp. 491 — 498. DOI: 10.12989/gae.2018.14.5.491.

7. Kahraman S., Canpolat A., Fener M. The influence of microwave treatment on the compressive and tensile strength of igneous rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 129, article 104303. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104303.

8. Рассказов И. Ю., Крюков В. Г., Потапчук М. И., Сидляр А. В. Геомеханические исследования структурных особенностей массива горных пород при проектировании карьера месторождения Дяппе // Маркшейдерия и недропользование. — 2018. — № 5(97). — С. 52–58.

9. Рассказов М. И., Потапчук М. И., Цой Д. И., Терешкин А. А., Гладырь А. В. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного месторождения Делькен // Проблемы недропользования. — 2020. — № 2(25). — С. 116–126. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.116.

10. Бурцев С. В., Левченко Я. В., Таланин В. В., Ворошилин К. С. Безвзрывные технологии подготовки скальных горных пород к перемещению конвейерным транспортом // Уголь. — 2018. — № 10. — С. 8–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-8-17.

11. Буткевич Г. Р. Взрывные и безвзрывные способы разрушения скальных пород на карьерах // Строительные материалы. — 2011. — № 2. — С. 33–34.

12. Лигоцкий Д. Н. Отработка контактных зон, с использованием гидромолотов, для снижения уровня потерь полезного ископаемого // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S1-4. — С. 7–13.

13. Монсини К. Р., Мазманян А. О. Повышение эффективности механического рыхления горных пород // Горный журнал. — 1998. — № 1. — С. 39–43.

14. La Roche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R. An application of simultaneous stochastic optimization at a large open-pit gold mining complex under supply uncertainty // Minerals. 2021, vol. 11, no. 2, pp. 172. DOI: 10.3390/min11020172.

15. Латышев О. Г., Корнилков М. В. Направленное изменение фрактальных характеристик, свойств и состояния пород поверхностно-активными веществами в процессах горного производства. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. — 407 с.

16. Норев Ю. Д., Мардонов У. М., Тошев О. Э. Изучение влияния водных растворов ПАВ на изменение прочности горного массива // Горный журнал. — 2005. — № 3. — С. 15–16.

17. Панишев С. В., 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. — С. 98–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-98-104.

18. Хосоев Д. В. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочность мерзлых пород Кангаласского месторождения // Горная промышленность. — 2013. — № 5. — С. 88–89.

19. Анистратов Ю. И., Штейнцга Р. М., Воронков Г. Я., Кузнецов А. Г., Хаспеков П. Р. Перспективы расширения сферы применения безвзрывных технологий в открытой угледобыче // Горная промышленность. — 1998. — № 2. — С. 14–19.

20. Шоболова Л. П., Коворова В. В. О создании комбинированной технологии разработки кимберлитов с применением жидких и газообразных ПАВ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2000. — № 1. — С. 178–179.

21. Николаев Н. И., Леушева Е. Л. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности бурения твердых горных пород // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2015. — Т. 14. — № 15. — С. 38–47. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.5.

22. Секисов А. Г., Рубцов Ю. И., Лавров А. Ю. Активационное кучное выщелачивание дисперсного золота из малосульфидных руд // Записки Горного института. — 2016. — Т. 217. — С. 96–101.

23. Бабич И. Н. Новые возможности оценки контрастности руд в недрах // Рациональное освоение недр. — 2020. — № 6. — С. 38–46. DOI: 10.26121/RON.2020.77.43.003.

24. Чебан А. Ю., Секисов Г. В. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2020. — Т. 18. — № 3. — С. 4–12. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12.

25. Каспарьян Э. В., Кузнецов Н. Н., Шоков А. Н., Пак А. К. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 4. — С. 69–84. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84.

26. Рассказов М. И., Цой Д. И., Крюков В. Г., Потапчук М. И., Федотова Ю. В. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного Албынского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 146–161. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_146.

27. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. — Л.: Недра, 1972. — 312 с.

28. Курочкин А. И., Кошкарев Е. В. Машины для производства земляных работ. Технические характеристики. — М.: ПКТИпромстрой, 1996. — 220 с.

29. Трубецкой К. Н., Потапов М. Г., Винницкий К. Е., Мельников Н. Н. и др. Справочник. Открытые горные работы. — М.: Горное бюро, 1994. — 590 с. **УДК**

## REFERENCES

1. Cheskidov V. I., Norri V. K., Zaitsev G. D., Botvinnik A. A., Bobylsky A. S., Reznik A. V. Effectivization of open pit hard mineral mining. technical problems of mining. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no. 5, pp. 107–122. [In Russ].

2. Afum B. O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit – underground mining options and transitions. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. 2019, vol. 34, no. 10, pp. 700–724. DOI: 10.1080/17480930.2019.1701968.

3. Sekisov G. V., Cheban A. Yu. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2021, no. 6, pp. 110–118. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20210610.

4. Marchevskaya V. V., Mukhina T. N. Physical-mechanical characteristics of the Kola peninsula low-sulfide ores. *Obogashchenie Rud*. 2014, no. 6, pp. 56–60. [In Russ].

5. Zhang Z.-X., Hou D.-F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 670–691. DOI: 10.1080/17480930.2021.1949878.

6. Burkhardt M., Kim E., Nelson P. P. EMI database analysis focusing on relationship between density and mechanical properties of sedimentary rocks. *Geomechanics and Engineering*. 2018, vol. 14, no. 5, pp. 491–498. DOI: 10.12989/gae.2018.14.5.491.

7. Kahraman S., Canpolat A., Fener M. The influence of microwave treatment on the compressive and tensile strength of igneous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 129, article 104303. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104303.

8. Rasskazov I. Yu., Kryukov V. G., Potapchuk M. I., Sidlyar A. V. Geomechanical studies of the structural features of rock massif at designing a quarry of Dyappe deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2018, no. 5(97), pp. 52–58. [In Russ].

9. Rasskazov M. I., Potapchuk M. I., Tsoy D. I., Tereshkin A. A., Gladyr A. V. Study of mining and geological features and definition of physical and mechanical properties of rocks of Delken gold deposits. *Problems of Subsoil Use*. 2020, no. 2(25), pp. 116–126. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.116.

10. Burtsev S. V., Levchenko Ya. V., Talanin V. V., Voroshilin K. S. Blastless technologies for rock mass conditioning for conveyor transportation. *Ugol'*. 2018, no. 10, pp. 8–17. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-8-17.

11. Butkevich G. R. Explosive and non-explosive methods of destruction of rocks in open pits. *Stroitel'nye materialy*. 2011, no. 2, pp. 33–34. [In Russ].

12. Ligotsky D. N. Development of contact zones with the use of hydrohammer in order to cut mineral losses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S1-4, pp. 7–13. [In Russ].

13. Monsini K. R., Mazmanyay A. O. Improving the efficiency of mechanical loosening of rocks. *Gornyi Zhurnal*. 1998, no. 1, pp. 39–43. [In Russ].

14. La Roche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R. An application of simultaneous stochastic optimization at a large open-pit gold mining complex under supply uncertainty. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 2, pp. 172. DOI: 10.3390/min11020172.

15. Latyshev O. G., Kornilkov M. V. *Napravlennoe izmenenie fraktal'nykh kharakteristik, svoystv i sostoyaniya porod poverkhnostno-aktivnymi veshchestvami v protsessakh gornogo proizvodstva* [Directed change of fractal characteristics, properties and state of rocks by surface-active substances in mining processes], Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 2016, 407 p.

16. Norov Yu. D., Mardonov U. M., Toshev O. E. Study of the effect of aqueous solutions of surfactants on the change in the strength of the rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2005, no. 3, pp. 15–16. [In Russ].

17. Panishev S. V., Khosoev 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, no. 1, pp. 98–104. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-98-104.

18. 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, no. 5, pp. 88–89. [In Russ].

19. Anistratov Yu. I., Shteintsag R. M., Voronkov G. Ya., Kuznetsov A. G., Khaspekov P. R. Prospects for expanding the scope of application of non-bursting technologies in open-pit coal mining. *Russian Mining Industry*. 1998, no. 2, pp. 14–19. [In Russ].

20. Shobolova L. P., Kovorova V. V. On the creation of a combined technology for the development of kimberlites using liquid and gaseous surfactants. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2000, no. 1, pp. 178–179. [In Russ].

21. Nikolaev N. I., Leusheva E. L. Theoretical and experimental investigation of hard rock drilling efficiency. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2015, vol. 14, no. 15, pp. 38–47. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.5.

22. Sekisov A. G., Rubtsov Yu. I., Lavrov A. Yu. Activation heap leaching of dispersed gold from low-sulphide ores. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 217, pp. 96–101. [In Russ].

23. Babich I. N. New opportunities for assessment ore contrast in the interior of deposits. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*. 2020, no. 6, pp. 38–46. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2020.77.43.003.

24. Cheban A. Yu., Sekisov G. V. Rationale for the use of a combined preparation for selective extraction of ores from complex structure deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 4–12. [In Russ]. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12.

25. Kasparyan E. E., Kuznetsov N. N., Shokov A. N., Pak A. K. Dynamic failure conditions in strong rock masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 69–84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84.

26. Rasskazov M. I., Tsoy D. I., Kryukov V. G., Potapchuk M. I., Fedotova Yu. V. Albyn gold deposit: geological features, physical and mechanical properties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 146–161. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_146.

27. Lomtadze V. D. *Metody laboratornykh issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornykh porod* [Methods of laboratory studies of physical and mechanical properties of rocks], Leningrad, Nedra, 1972, 312 p.

28. Kurochkin A. I., Koshkarev E. V. *Mashiny dlya proizvodstva zemlyanykh rabot. Tekhnicheskie kharakteristiki* [Machines for the production of earthworks. Specifications], Moscow, PKTIpromstroy, 1996, 220 p.

29. Trubetskoy K. N., Potapov M. G., Vinnitskiy K. E., Mel'nikov N. N., etc. *Spravochnik. Otkrytye gornye raboty* [Guide. Open-pit mining], Moscow, Gornoe byuro, 1994, 590 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Чебан Антон Юрьевич*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: chebanay@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2707-626X,

*Секисов Артур Геннадьевич*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник,

e-mail: sekisovag@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5780-6150,

*Рассказов Максим Игоревич*<sup>1</sup> — научный сотрудник,

e-mail: rasm.max@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9130-8072,

*Цой Денис Игоревич*<sup>1</sup> — научный сотрудник,

e-mail: denis.tsoi@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4501-3724,

*Терешкин Андрей Александрович*<sup>1</sup> — научный сотрудник,

e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7376-9169,

<sup>1</sup> Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.

**Для контактов:** Чебан А.Ю., e-mail: chebanay@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.Yu. Cheban*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher, e-mail: chebanay@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-2707-626X,

*A.G. Sekisov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),  
Chief Researcher, e-mail: sekisovag@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5780-6150,

*M.I. Rasskazov*<sup>1</sup>, Researcher,

e-mail: rasm.max@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9130-8072,

*D.I. Tsoi*<sup>1</sup>, Researcher,

e-mail: denis.tsoi@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4501-3724,

*A.A. Tereshkin*<sup>1</sup>, Researcher,

e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7376-9169,

<sup>1</sup> Mining Institute, Far Eastern Branch

of Russian Academy of Sciences,

680000, Khabarovsk, Russia.

**Corresponding author:** A.Yu. Cheban, e-mail: chebanay@mail.ru.

Получена редакцией 06.06.2022; получена после рецензии 28.07.2022; принята к печати 10.08.2022.

Received by the editors 06.06.2022; received after the review 28.07.2022; accepted for printing 10.08.2022.