РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.013

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Калмыков В.Н.¹, Петрова О.В.¹, Мамбетова Ю.Д.²¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия² ООО «УралГеоПроект», Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): анализ опыта отработки медно-колчеданных месторождений подземным способом показал, что практически все они характеризуются неблагоприятными горно-геологическими условиями, при которых существующие принципы проектирования горнотехнической системы не обеспечивают стабильных показателей эффективности горного производства и требуемую устойчивость в условиях колебаний цен на металлы, изменчивости содержания металла в руде и др., что приводит к временному прекращению горных работ из-за снижения технико-экономических показателей. Своевременная оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы позволит осуществить выбор наиболее оптимального комплекса, а методика, предложенная на основе коэффициента устойчивости горнотехнической системы, позволяет определить параметры резервов, которые компенсируют негативное влияние ухудшения рыночных и горно-геологических условий отработки при подземной разработке медно-колчеданных месторождений. **Цель работы:** повышение эффективности горных работ в период снижения устойчивости горнотехнической системы в результате падения цен на металлы и ухудшения горно-геологических условий подземной разработки медно-колчеданных месторождений. **Используемые методы:** комплексный подход, включающий анализ и обобщение достижений науки, техники и практики проектирования и эксплуатации медно-колчеданных месторождений, результатов отечественных и зарубежных исследований; экономико-математическое моделирование и технико-экономические расчеты с обработкой данных методами математической статистики. **Новизна:** к элементам новизны относится предложенный коэффициент устойчивости функционирования горнотехнической системы, который учитывает технологические, экономические, горно-геологические факторы. **Результат:** предложенный коэффициент устойчивости позволит осуществить прогнозную и текущую оценку уровня устойчивости горнотехнической системы при подземной разработке, оперативно реагировать на изменения множества факторов, которые оказывают на нее влияние, и разработать дальнейшую стратегию развития предприятия. **Практическая значимость:** своевременная оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы позволит осуществить выбор наиболее оптимальных технологических решений, направленных на ее обеспечение.

Ключевые слова: устойчивость функционирования горнотехнической системы, управляемые и неуправляемые факторы, коэффициент устойчивости горнотехнической системы, периоды устойчивости и неустойчивости.

Введение

Анализ состояния горных работ медно-колчеданных месторождений Южного Урала, отработываемых подземным способом, показал, что большинство из них на сегодняшний день находится на стадии доработки, а горнотехническая обстановка характеризуется ухудшением горно-геологических условий, среди которых следует выделить возрастание горного давления, связанное с переходом горных работ на более глубокие горизонты (Юбилейное, Гайское и др.), снижение содержания полезных компонентов в руде (Ново-Учалинское), усложнение морфологии и строения рудных тел, увеличение доли труднообогатимых руд (Озерное). Освоение месторождений осу-

ществляется на фоне постоянных колебаний цен на металлы, курса доллара, что приводит к нарушению устойчивости функционирования горнотехнической системы за счет вынужденных простоев, отклонений от проектных технико-экономических показателей и корректировок планов производства, которые вызваны повышением себестоимости добычи руды на фоне снижения ценности добываемого сырья [1, 2].

Технические и технологические решения

Под устойчивостью функционирования горнотехнической системы понимается способность системы поддерживать параметры на заданном уровне, эффективно противодействуя влиянию внешних воздействий [3].

Анализ технико-экономических показателей

горных предприятий Южного Урала показал, что на устойчивость функционирования горно-технической системы оказывает влияние совокупность внешних и внутренних факторов [4], которые в зависимости от возможности воздействия на них подразделяются на управляемые и неуправляемые (рис. 1).

Факторы, влияющие на устойчивость функционирования горнотехнической системы при подземной разработке месторождений, предлагается подразделять на следующие группы: технологические, технические, организационные, экологические, горно-геологические и рыночные.

Технологические факторы, а именно объем добычи, способ вскрытия, технология очистной выемки и др., уже на стадии проектирования оказывают существенное влияние на показатели функционирования горнотехнической системы, так как во многом определяют капитальные и эксплуатационные затраты и, как следствие, принятие решения о целесообразности освоения запасов. На стадии эксплуатации месторождения стабильная работа подземного рудника и требуемые показатели эффективности в большей мере определяются техническими и организационными факторами за счет их направленности на обеспечение необходимого уровня производительности, надежности.

На сегодняшний день большое внимание уделяется и экологической составляющей, т.к. отходы добычи, минерализованные промышленные стоки и подземные выработанные пространства необходимо рассматривать не только с точки зре-

ния их негативного влияния на окружающую среду, но и как техногенные георесурсы, освоение которых позволит расширить минерально-сырьевую базу наряду с сокращением экологического воздействия [4].

Существенное влияние на устойчивость функционирования горнотехнической системы оказывают рыночные и горно-геологические факторы, так как именно они являются исходными данными при принятии технологических решений по отработке месторождения и по своей сути являются неуправляемыми, то есть предприятие не может на них воздействовать. В результате непостоянства неуправляемых факторов, таких как содержание металлов в руде, цена на металлы и др., они оказывают наибольшее влияние на параметры горнотехнической системы.

Степень устойчивого функционирования горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений возможно оценивать с помощью коэффициента устойчивости функционирования горнотехнической системы, который показывает насколько может снижаться эффективность освоения запасов до того, как отработка месторождения окажется в зоне убытков. Коэффициент устойчивости горнотехнической системы и его нормативное значение принято по аналогии с коэффициентом запаса финансовой прочности. Нормативное значение составляет 10% согласно исследованиям Замбражицкой Е.С., Жданова И.Ю., Стояновой Е.С., Павловой Л.П. и других ученых [5].

Рис. 1. Факторы, влияющие на устойчивость функционирования горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений

$$K_{уст} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m 3_{ji} \cdot Q_{ji} + 3_{\Pi} + P_{\Pi} + A)}{\sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i \cdot \varepsilon (1 - P_i) \cdot \Pi_i \cdot k_s + \sum_{k=1}^n \Pi_k \cdot Q_k} \right) \cdot 100 \geq 10\%, \quad (1)$$

где $i=1 \dots n$ – вариант системы разработки месторождения; 3_{ji} – удельные переменные затраты на j -й процесс при i -м варианте системы разработки, руб./т (руб./м³, руб./пог.м, руб./ткм); Q_{ji} – объем работ, выполняемых в j -м процессе при i -м варианте системы разработки, т (м³, пог.м, ткм); 3_{Π} – постоянные затраты (вентиляция, водоотлив и др.), руб.; P_{Π} – прочие расходы (в том числе налог на добычу полезного ископаемого, экологические платежи), руб.; A – амортизация, руб.; A_i – производственная мощность при i -м варианте системы разработки, т/год; C_i – содержание металла в руде, доли ед.; ε – извлечение полезного компонента при обогащении, доли ед.; P_i – разубоживание руды, доли ед.; Π_i – цена на металл на LME, \$/т; k_s – курс доллара руб./\$; Π_k – ценность k -го техногенного георесурса, руб.; Q_k – объем k -го техногенного георесурса, т.

Использование коэффициента устойчивости позволяет осуществить прогнозную и текущую оценку уровня устойчивости горнотехнической системы при подземной разработке и оперативно реагировать на изменения множества факторов, которые оказывают на нее влияние.

Для оценки степени влияния факторов на устойчивость функционирования горнотехнической системы произведено экономико-математическое моделирование условий подземной разработки медно-колчеданных месторождений при использовании систем разработки различного класса и производственной мощности рудника до 1, от 1 до 3 и более 3 млн т/год (рис. 2) [6–8].

Анализ результатов расчета показал, что наибольшее влияние на устойчивость горнотехнической системы при подземной разработке медно-колчеданных месторождений оказывают производственная мощность рудника и применяемая система разработки. В зависимости от применяемой технологии степень влияния цены на медь, содержания меди в руде и неподтверждения запасов разная. Наиболее устойчивы к изменению рыночных и горно-геологических факторов горнотехнические системы с системой разработки с обрушением руд и вмещающих пород, наименее устойчивы к изменениям системы разработки с горизонтальными слоями с закладкой.

Рис. 2. Зависимость коэффициента устойчивости горнотехнической системы от цены на металл (а), содержания меди в руде (б), объемов запасов (в) при производственной мощности подземного рудника до 1 млн т/год

В рамках горнотехнической системы установлено, что наибольшее влияние на коэффици-

ент устойчивости оказывают цены на медь и ее содержание в руде (снижение на 10% приводит к потере уровня устойчивости горнотехнической системы в 1,2–4 раза). Менее значимым является фактор неподтверждения данных по запасам – при уменьшении запасов на 10 % коэффициент устойчивости снижается в 1,1–1,7 раз в зависимости от применяемого вида системы разработки и производственной мощности рудника.

Из результатов экономико-математического моделирования следует, что компенсировать потерю устойчивости возможно снижением затрат на добычу полезного ископаемого, регулированием объемов добычи, перехода на системы разработки другого класса, перехода на участки с более высоким содержанием меди в руде или поддержанием высоких показателей качества добычи и др.

Функционирование горнотехнической системы осуществляется в условиях совокупного влияния рыночных и горно-геологических факторов. Анализ динамики цены на медь за период 2008–2015 гг. показал, что ее изменения носят циклический характер, при котором быстрый рост сменяется затяжным падением. Вместе с тем при подземной разработке большинства медно-колчеданных месторождений наблюдается снижение с глубиной отработки содержания меди в руде на 0,15 % каждые 40–60 м. Вовлекаемые на сегодняшний день в разработку запасы имеют категорию В+С₁, ошибка подсчета которых составляет ± 30–60%. Поэтому была поставлена задача оценить динамику коэффициента устойчивости в условиях изменения цены на медь и снижения содержания меди в руде при подземной разработке медно-колчеданных месторождений и неподтверждения данных по запасам при применении различных вариантов систем разработки и производственной мощности рудника до 1, от 1 до 3 и более 3 млн т/год (рис. 3).

Из анализа полученных графических данных следует, что в результате неподтверждения данных по запасам на 10, 20 и 30% срок отработки месторождения сокращается соответственно на 1, 2 и 3 года.

Из графика видно, что в зависимости от применяемой системы разработки коэффициент устойчивости горнотехнической системы на различных этапах функционирования разный, что определяет наличие периодов устойчивости, когда $K_{уст} \geq 10\%$, и неустойчивости, когда $K_{уст} \leq 10\%$. Длительность периода неустойчивости и уровень снижения коэффициента устойчивости будет определять ущерб, который в результате потери устойчивости необходимо компенсировать. Результатами экономико-математического моделирования установлено,

что длительность периода устойчивости составляет 0,5–1,2 года, при этом снижение коэффициента устойчивости может составлять от –8,4 до –58,8 %, что свидетельствует о неэффективности функционирования горнотехнической системы.

Рис. 3. Динамика коэффициента устойчивости горнотехнической системы при изменении цены на медь и содержания меди в руде при производственной мощности рудника 1–3 млн т/год

Анализ периодов устойчивости показал, что их длительность составляет 2,5–6 лет при значении коэффициента устойчивости от 43,1 до 61,2 %, что говорит о достаточности финансовых и временных возможностей для формирования технологических резервов, направленных на компенсацию ущерба от снижения коэффициента устойчивости.

Учитывая, что срок отработки большинства медно-колчеданных месторождений составляет 20–30 лет, можно прогнозировать периоды неустойчивости каждые 3–7 лет длительностью от 0,5 до 15 мес, когда горнотехническая система будет функционировать неэффективно [9–12].

Анализ периодов устойчивости показал, что их длительность составляет 3–5 лет, что позволяет за это время формировать технологические решения в виде резервов, направленных на повышение качества добываемого сырья, повышения производительности оборудования и др., которые позволят поддержать проектные технико-экономические показатели и обеспечить

устойчивость функционирования горнотехнической системы при подземной разработке месторождения в период негативного влияния изменения цен на металлы, ухудшения горно-геологических условий. Учитывая, что коэффициент устойчивости функционирования в период устойчивого функционирования при разных системах разработки разный, что определяет различный объем прибыли, необходимо формировать технологические резервы в зависимости от технологии и интенсивности отработки.

Для условий медно-колчеданных месторождений Учалинское, Ново-Учалинское и Озерное, отрабатываемых либо планируемых к отработке подземным способом, произведена оценка уровня устойчивости горнотехнической системы (см. таблицу).

Результаты расчета коэффициента устойчивости для условий медно-колчеданных месторождений Учалинское, Ново-Учалинское и Озерное

Показатели	Условное обозначение	Значения		
Месторождения	—	Учалинское	Ново-Учалинское	Озерное
Содержание меди в руде (приведенное содержание п.к. в руде), %	C_m	1,75	1,8	2,27
Цена на медь на 15.01.2016 \$/т	C_m	4300		
Курс доллара, руб./\$	$K_{\$}$	71		
Производственная мощность рудника, тыс.т/год	A_r	1500	2500	400
Разубоживание, %	P	10,3	8	5
Потери, %	Π	4,9	6	5
Удельный объем подготовительно-нарезных работ, м ³ /тыс.т	$V_{\text{пнр уд}}$	60	35	61
Коэффициент устойчивости горнотехнической системы	$K_{\text{уст}}$	7	13	18

Анализ результатов расчета показал, что при цене 4300 \$/т горнотехническая система при отработке месторождений Ново-Учалинское и Озерное будет функционировать устойчиво. Однако дальнейшее падение цены ниже 4000 \$/т приведет к потере устойчивости, и предприятие будет функционировать неэффективно. При отработке месторождения Учалинское при цене 4300 \$/т происходит потеря устойчивости. При

своевременной оценке и подготовке резервов устойчивости горнотехнической системы возможно было сохранить на уровне 10%.

Заключение

Таким образом, при подземной разработке медно-колчеданных месторождений влияние рыночных и горно-геологических факторов приводит к потере устойчивости горнотехнической системы. Постоянные колебания цен на металлы и снижение с глубиной содержания полезных компонентов в руде обуславливают зоны устойчивого и неустойчивого функционирования горнотехнической системы. Длительность периодов устойчивости функционирования горнотехнической системы составляет 0,5–15 мес, что позволяет сформировать резервы для компенсации спада коэффициента устойчивости в результате негативного влияния неуправляемых факторов.

Использование критерия для оценки устойчивости функционирования горнотехнической системы позволит осуществить выбор наиболее оптимальных технологических решений, направленных на обеспечение устойчивости горнотехнической системы в период негативного влияния экономических факторов.

Список литературы

1. Радченко Д.Н. К вопросу обоснования рациональных масштабов эксплуатации запасов рудных месторождений для устойчивого развития горнотехнических систем // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр / под ред. акад. К.Н. Трубецкого. М.: ИПКОН РАН, 2014. С. 246–249.
2. Пешков А.М. Обоснование требований к качеству руд и техногенного сырья при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений Урала: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.21 / Пешков Алексей Михайлович. М., 2014. 160 с.
3. Батурина Н.С., Ткач С.М., Баракаева И.Д. Факторы внешней и внутренней среды как элементы управления эффективностью функционирования горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. №10. С. 70–75.
4. Пронин Э.М., Васильев В.Е., Цветков В.Ю. Факторы, определяющие устойчивое развитие предприятий минерально-сырьевого комплекса, и их влияние на оценку результатов деятельности предприятий // Экономические проблемы развития минерально-сырьевой и топливно-энергетического комплексов России. Санкт-Петербург, 2011. 337 с.
5. Замбрицкая Е.С., Скрылева Г.И. Запас финансовой прочности, как показатель оценки экономической эффективности инвестиционных проектов по созданию производственных объектов // Молодой ученый. 2013. №2. С. 128–132.

6. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Оценка условий обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем в условиях неопределенности исходной горно-геологической информации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. №4. С. 400–409.
7. Калмыков В.Н., Петрова О.В., Янтурина Ю.Д. Оценка технологических резервов обеспечения устойчивого развития горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2014. №10. С. 69–77.
8. Nikolaev M. V., Grigorieva E. E., Gulyaev P. V. Assessment of risks influencing innovation activity of industrial enterprises (on example of diamond-brilliant complex). Eurasian mining. 2016. №2, pp. 8–14.
9. Simon Walker. Tools to assist in Planning and Design. Engineering and Mining Journal. 2013 January, pp. 34–39.
10. Jesse Morton. Mine Planning Software Empowers Grade Controllers. Engineering and Mining Journal. 2017, February, pp. 28–33.
11. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10–17.
12. Каплунов Д.Р., Юков В.А. Предварительная оценка допустимой величины колебаний основных показателей работы рудника // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №9. С. 5–12.

Поступила 10.05.17.

Принята в печать 23.08.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>

EVALUATING THE SUSTAINABILITY OF THE MINING SYSTEM IN UNDERGROUND COPPER-PYRITE MINING

Vyacheslav N. Kalmykov – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk Russia. E-mail: prmpi@maqtu.ru

Olga V. Petrova – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk Russia. E-mail: prmpi@maqtu.ru

Yuliya D. Mambetova – Ph.D. (Eng.), Lead Specialist

UralGeoProekt LLC, Magnitogorsk Russia. E-mail: mambetova_yuliya@bk.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): Analysis of the copper-pyrite underground mining history showed that almost all the mines face adverse mining and geological conditions, under which the actual design principles for mining systems fail to deliver stable performance and desired sustainability considering the fluctuation of metal prices, the variability of metal concentrations, etc. A drop in performance indicators may necessitate suspension of mining operations. Due to a timely evaluation of the sustainability level of the mining system in place, the mine operator can determine what complex of equipment will offer the best value. The proposed approach, which is based on the mining system sustainability index, allows to determine what parameters of the reserves will help offset the negative impact of deteriorating market and geological conditions in underground copper-pyrite mining. **Objectives:** The objective of this research is to increase the efficiency of mining operations in a period of declining sustainability of the mining system resulting from falling metal prices and deteriorating geological conditions in underground copper-pyrite mining. **Methods Applied:** A comprehensive approach that includes analysis and synthesis of scientific, technological and

practical achievements in design and exploitation of copper-pyrite deposits, as well as the results obtained by both Russian and foreign researchers; mathematical modelling and feasibility studies with the methods of mathematical statistics applied for data processing. **Originality:** The original features of this research include the proposed mining system sustainability index, which takes into account operational, economic, mining and geological factors. **Findings:** The proposed sustainability index will help evaluate the current and expected sustainability of an underground mining system, quickly respond to changes of multiple impact factors and elaborate a further development strategy for the mining company. **Practical Relevance:** A timely evaluation of the mining system sustainability will help identify the best solutions to ensure its continuity.

Keywords: Mining system sustainability, controllable and uncontrollable factors, mining system sustainability index, periods of stability and instability.

References

1. Radchenko D.N. On justification of rational exploitation of ore reserves for sustainable development of mining sys-

- tems. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh neдр* [Problems and prospects of comprehensive development and conservation of mineral resources]. Ed. by K.N. Trubetskoy. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, 2014, pp. 246–249.
2. Peshkov A.M. Substantiating the requirements to the quality of ores and industrial raw materials in the comprehensive development of copper-pyrite deposits of the Urals: Ph.D. dissertation. Moscow, 2014, 160 p.
 3. Batugina N.S., Tkach S.M., Barakaeva I.D. Factors of external and internal environment that can be used to control the efficiency of mining sites. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)]. 2008, no. 10, pp. 70–75.
 4. Pronin E.M., Vasilyev V.E., Tsvetkov V.Yu. Factors determining the sustainable development of companies in the mineral resources sector, and their impact on the companies' performance analysis. *Ekonomicheskie problemy razvitiya mineralno-syrievogo i toplivno-energeticheskogo kompleksov Rossii* [Economic problems of developing mineral resources and energy sectors of Russia]. Saint-Petersburg, 2011, 337 p.
 5. Zambrzhitskaya E.S., Skryleva G.I. Financial safety as an indicator of economic efficiency of investment projects aimed at creating production facilities. *Molodoy uchenyi* [Young scientist], 2013, no. 2, pp. 128–132.
 6. Kaplunov D.R., Yukov V.A. Analysis of the conditions ensuring sustainability of the mining system in the situation when the initial geological information is lacking certainty. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)], 2013, no. 4, pp. 400–409.
 7. Kalmykov V.N., Petrova O.V., Yanturina Yu.D. Analysis of the reserves for ensuring sustainable development of a mining system in underground ore mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). Otdelnye statyi (spetsialnyi vypusk)* [Mining bulletin (scientific journal). Individual publications (special issue)], 2014, no. 10, pp. 69–77.
 8. Nikolaev M.V., Grigorieva E.E., Gulyaev P.V. Assessment of risks influencing innovation activity of industrial enterprises (on the example of the diamond-brilliant complex). *Eurasian mining*. 2016, no. 2, pp. 8–14.
 9. Simon Walker. Tools to assist in Planning and Design. *Engineering and Mining Journal*. 2013, January, pp. 34–39.
 10. Jesse Morton. Mine Planning Software Empowers Grade Controllers. *Engineering and Mining Journal*. 2017, February, pp. 28–33.
 11. Sokolov I.V., Baranovskiy K.V. Selection of an efficient mining system for underground mining of quartz. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 2, pp. 10–17.
 12. Kaplunov D.R., Yukov V.A. A preliminary estimation of the allowable fluctuations of the key mine performance indicators. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining bulletin (scientific journal)], 2011, no. 9, pp. 5–12.

Received 10/05/17

Accepted 23/08/17

Образец для цитирования

Калмыков В.Н., Петрова О.В., Мамбетова Ю.Д. Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы при подземной разработке медно-колчеданных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 5–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>

For citation

Kalmykov V.N., Petrova O.V., Mambetova Yu.D. Evaluating the sustainability of the mining system in underground copper-pyrite mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 5–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-5-11>