ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):285–292
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.765 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_285

# ФЛОТОКЛАССИФИКАЦИЯ МЕДНЫХ РУД С ОБОГАЩЕНИЕМ ПЕННЫХ ПРОДУКТОВ В СУЖАЮЩИХСЯ ЖЕЛОБАХ

**Ю. П. Морозов**[1], **Т. И. Интогарова**[2], **О. С. Валиева**[2], **М. Ж. Битимбаев**[3]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия;
[2] Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, Саха (Якутия), Мирный, Россия;
[3] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Сатпаева, д. 22а

***Аннотация:*** Рассмотрена структурная схема флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенных продуктов в сужающихся желобах в области переработки сульфидных медных руд. Выполнен теоретический анализ замкнутого цикла измельчения с процессом флотоклассификации. Подробно описана имитация замкнутого цикла измельчения в режимах без флотоклассификации и с флотоклассификацией. Приведены результаты распределения меди по классам крупности слива гидравлической классификации и флотоклассификации. Описана методика проведения экспериментального исследования флотоклассификации с обогащением пенных продуктов в сужающихся желобах на медной руде «Еленовского» месторождения. Показано, что флотоклассификация в замкнутом цикле измельчения обеспечивает получение кондиционного медного концентрата, отвальных хвостов и промпродукта, направляемого на последующую операцию флотации, в количестве 60% от исходного питания, что приводит к снижению машиноемкости, энергетических и капитальных затрат флотационного отделения. На уровне изобретения разработан флотоклассификатор, новыми элементами которого является установка воздушного и электрохимического аэраторов в сужающемся желобе. Раскрывается актуальность флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенных продуктов в сужающихся желобах, которая заключается в повышении технологических показателей за счет снижения переизмельчения минералов.

***Ключевые слова:*** замкнутый цикл измельчения, переизмельчение минералов, флотоклассификация, сужающиеся желоба, верхний продукт, нижний продукт, экспериментальное моделирование, воздушная аэрация, электрохимическая аэрация.

***Благодарности:*** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Комитета Фонда Науки № 163–18-ГК республики Казахстан «Реализация в производственных условиях инновационной технологии электрохимической хлоринации для прямого извлечения из руды и хвостов обогащения цветных и драгоценных металлов».

***Для цитирования:*** *Морозов Ю. П.*, *Интогарова Т. И.*, *Валиева О. С.*, *Битимбаев М. Ж.* Флотоклассификация медных руд с обогащением пенных продуктов в сужающихся желобах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 285–292. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_285.

© Ю. П. Морозов, Т. И. Интогарова, О. С. Валиева, М. Ж. Битимбаев. 2021

# Flotoclassification of copper ore with convergent trough cleaning of frother products

**Yu. P. Morozov**[1], **T. I. Intogarova**[2], **O. S. Valieva**[2], **M. Zh. Bitimbaev**[3]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;
[2] Mirny Polytechnic Institute, Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russia;
[3] Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan

***Abstract:*** The paper discusses a flowchart of flotoclassification (size classification while floating) within a closed circuit of grinding, with froth treatment in converging chutes during processing of cupper sulfide ore. The closed circuit of grinding with flotoclassification is analyzed theoretically. A comprehensive description of simulated closed grinding circuit with and without flotoclassification is given. The copper size grading data after wet screening and in flotoclassification are compared. The experimental testing of flotoclassification with froth treatment in converging chutes is presented as a case-study of Elenovskoe copper ore. It is shown that flotoclassification included in the closed grinding circuit produces standard quality copper concentrate, tailings and middlings sent to the next flotation stage, in amount of 60% of initial feedstock, which reduces machine hours, energy usage and capital input in flotation. An innovative flotoclassifier is designed, with jet and electrochemical aerators arranged in a converging chute. The relevance of the flotoclassification within the closed grinding circuit with froth treatment in converging chutes consists in improved performance of the technology thanks to reduced over-grinding of minerals.

***Key words:*** closed grinding circuit, over-grinding, flotoclassification, converging chutes, overflow, underflow, experimental modeling, pneumatic aeration, electrochemical aeration.

***Acknowledgments:*** The research was carried out with the financial support of the grant of the Committee of the Science Foundation No. 163-18-GC of the Republic of Kazakhstan «Implementation in production conditions of innovative electrochemical chlorination technology for direct extraction from ore and tailings of non-ferrous and precious metals enrichment».

***For citation:*** Morozov Yu. P., Intogarova T. I., Valieva O. S., Bitimbaev M. Zh. Flotoclassification of copper ore with convergent trough cleaning of frother products. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):285–292. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_285.

## Введение

Обогащение сульфидных медных руд вызывает определенные трудности, связанные: со сложным вещественным составом, текстурно-структурными особенностями, содержанием различных микровключений [1, 2], высоким взаимопрорастанием полезных компонентов [3], особенно переизмельчением [4, 5], образованием вторичных шламов при вскрытии ценных компонентов [6, 7], которые негативно влияют на технологические показатели процесса флотации [8].

Основными недостатками технологических схем стадиального измельчения [3] и флотации [3] являются потери ценного компонента с отвальными хвостами и разноименными концентратами [3].

В настоящее время в области обогащения применяют различные направления для снижения переизмельчения, повышения извлечения, в том числе избирательное раскрытие минералов [9], принцип фракционного концентрирования в схемах стадиальной фло-

тации [10, 11], контроль крупности измельчения с помощью современных автоматических устройств [12].

Одним из эффективных методов повышения показателей флотации за счет снижения переизмельчения минералов является использование процесса флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения.

Отличием замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией является получение более крупных песков в гидравлической классификации. Флотоклассификация в замкнутом цикле измельчения позволяет извлекать в пенный продукт флотируемые компоненты по мере их вскрытия, что резко снижает переизмельчение минералов и образование вторичных шламов [13, 14].

Исследование флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с сужающимися желобами

На основе исследования закономерностей флотоклассификации с обогащением пенных продуктов в сужающихся желобах разработана структурная схема флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с сужающимися желобами (рис. 1).

Выполнен теоретический анализ замкнутого цикла измельчения с процессом флотоклассификации. В реальных условиях работы мельницы в замкнутом цикле эффективность классификации в классифицирующем аппарате составляет 50 — 65%, следовательно, происходит взаимозасорение слива крупными классами, а песков —

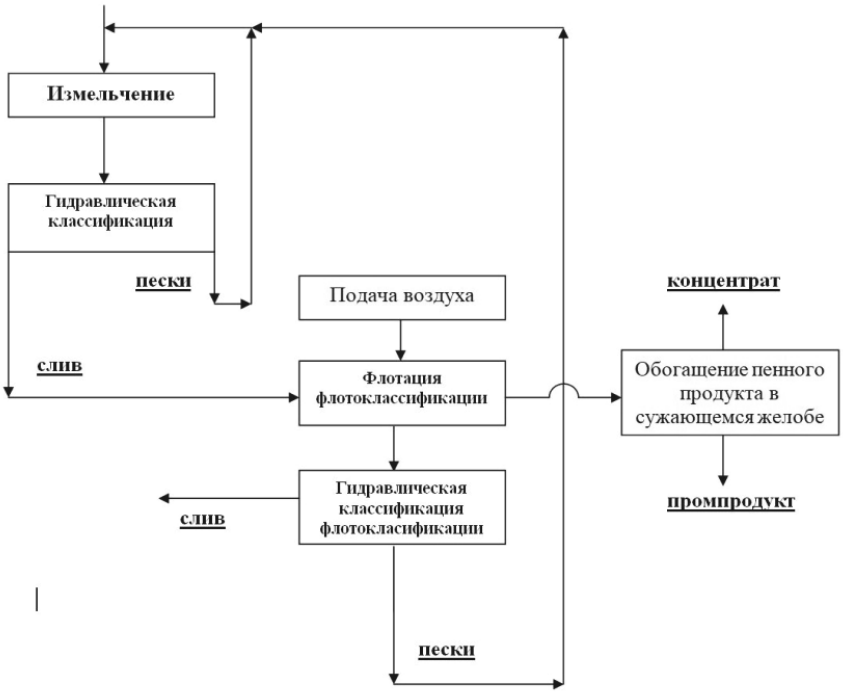


*Рис. 1. Структурная схема флотоклассификации с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе в замкнутом цикле измельчения*
*Fig. 1. Flowchart of flotoclassification with froth treatment in converging chutes in closed grinding circuit*

мелкими классами крупности. Если увеличить крупность разделения в гидроциклоне, то потери шламов с песками гидроциклона существенно снижаются.

Выполнено экспериментальное моделирование замкнутого цикла измельчения с процессом флотоклассификации. В лабораторных условиях на медной руде Еленовского месторождения, дробленой до крупности минус 1,4 мм, реализована имитация замкнутого цикла измельчения в режимах без флотоклассификации и с флотоклассификацией.

Исходную навеску массой 500 г крупностью минус 1,4 мм измельчали в лабораторной шаровой мельнице в течение 15 минут. Измельченную навеску подвергали гидравлической классификации в лабораторном конусном гидроклассификаторе с получением слива и песков.

Пески гидравлической классификации первой ступени объединяли со второй исходной навеской массой 500 г и измельчали в лабораторной шаровой мельнице и гидравлической классификации в конусном гидравлическом классификаторе с получением слива и песков. Далее аналогично измельчали исходную навеску 3, 4, 5. Сливы всех ступеней имитации замкнутого цикла взвешивали и определяли их выходы.

В режиме замкнутого цикла без флотоклассификации после пяти ступеней измельчения выход слива составил 97,5%, что соответствует ошибке воспроизводимости замкнутого цикла измельчения 2,5%. Циркулирующая нагрузка в условиях эксперимента составила 141,1%.

Слив последней ступени имитации подвергали по классам крупности химическому анализу на медь. В табл. 1 приведены показатели гидравлической классификации по классам крупности.

Опыты по имитации замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией проводили аналогично. Отличием является увеличение крупности разделения в гидравлической классификации с 40 мкм без флотоклассификации до 200 мкм с флотоклассификацией слива гидроциклона. Показатели флотоклассификации по классам крупности приведены в табл. 2.

Сравнение результатов табл. 1 и 2 показывает, что использование флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения приводит к снижению потерь меди в сливе с классом крупности минус 0,01 мм с 8,76% без флотоклассификации до 0,96% с флотоклассификацией.

По представленной методике проведены эксперименты флотоклассификации в замкнутом цикле с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе.

Эксперименты показали, что в сливе флотоклассификатора получены отвальные хвосты с массовой долей меди 0,13% при потерях меди с хвостами 2,05%, в верхнем продукте сужающегося желоба — кондиционный медный концентрат с массовой долей меди 18% при извлечении в него меди 38,52%, а в нижнем продукте сужающегося желоба пригодный для последующей флотации продукт с массовой долей меди 1,85% при извлечении в него меди 59,4%. Выход питания последующей флотации снижается со 100% до 64%, что свидетельствует о возможности сокращения машиноемкости, энергетических и капитальных затрат в отделении флотации.

Проводились экспериментальные исследования флотоклассификации с обогащением пенных продуктов в сужающихся желобах на медной руде месторождения «Еленовское».

Опыты на руде «Еленовского» месторождения проводили на пробе

*Таблица 1*

***Результаты распределения меди по классам крупности слива гидравлической классификации***

***Size grading of copper particles after wet screening***

| Наименование продукта | Выход, % | Массовая доля меди, % | Извлечение меди, % |
|---|---|---|---|
| Класс крупности — 0,01 мм | 7,79 | 2,95 | 8,76 |
| Класс крупности — 0,071+ 0, 01 мм | 59,31 | 2,05 | 60,79 |
| Класс крупности + 0,071 мм | 32,90 | 1,85 | 30,45 |
| Итого | 100,00 | 2,00 | 100,00 |

*Таблица 2*

***Результаты распределения меди по классам крупности слива флотоклассификации***

***Size grading of copper particles after flotoclassification***

| Наименование продукта | Выход, % | Массовая доля меди, % | Извлечение меди, % |
|---|---|---|---|
| Класс крупности — 0,01 мм | 3,1 | 0,6 | 0,96 |
| Класс крупности — 0,071+ 0, 01 мм | 65,3 | 2,06 | 67,44 |
| Класс крупности + 0,071 мм | 31,6 | 2,00 | 31,6 |
| Итого | 100,00 | 2,0 | 100,00 |

*Таблица 3*

***Результаты эксперимента по флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе***

***Test flotoclassification in closed grinding circuit with froth treatment in converging chutes***

| Наименование продукта | Выход, % | Массовая доля меди, % | Извлечение меди, % |
|---|---|---|---|
| Верхний продукт сужающегося желоба | 4,28 | 18,0 | 38,52 |
| Нижний продукт сужающегося желоба | 64,22 | 1,85 | 59,43 |
| Слив флотоклассификации | 31,5 | 0,13 | 2,05 |
| Исходное питание | 100,00 | 2,00 | 100,00 |

с массовой долей меди 2,34%. Производительность по исходному питанию составляла 8,0 кг/ч, давление воздуха на входе в аэрационную систему составляло 0,1 МПа. Расход бутилового ксантогената — 60 г/т, расход вспенивателя Т-80 — 40 г/т. Пробу руды перед флотоклассификацией измельчали до крупности 65% класса минус 0,071 мм. Измельченную пробу непрерывно в виде пульпы подавали в операцию флотоклассификации.

На руде «Еленовского» месторождения при флотоклассификации в верхнем продукте сужающегося желоба возможно получение кондиционного медного концентрата с массовой долей меди 21,1% при извлечении в него меди 27,14% по отношению к исходному питанию. В нижнем продукте желоба получается промпродукт с массовой долей меди 15,56%. В сливе флотоклассификатора получили отвальные хвосты с массовой долей меди 0,13% при потерях меди в нем 2,76%.

Для повышения эффективности флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения на уровне изобре-

*Таблица 4*

***Результаты флотоклассификации руды месторождения «Еленовское»***
***Flotoclassification data of Elenovskoe ore***

| Наименование продукта | Выход, γ, % | Массовая доля, % | Извлечение, % |
|---|---|---|---|
| Верхний продукт | 3,01 | 21,1 | 27,14 |
| Нижний продукт | 2,42 | 15,56 | 16,4 |
| Пенный продукт | 5,43 | 18,76 | 43,54 |
| Слив | 49,69 | 0,13 | 2,76 |
| Пески | 44,88 | 2,8444 | 53,70 |
| Итого | 100 | 2,34 | 100 |

тения разработано новое техническое решение, включающее аэрацию пенного продукта в сужающемся желобе.

Разработанное техническое решение испытано в промышленных условиях обогатительной фабрики ОАО «Святогор» при переработке медной руды «Сафьяновского» месторождения. Выполнено сравнение показателей работы флотоклассификатора по известному техническому решению без аэраторов в сужающихся желобах и по предлагаемому техническому решению с аэраторами на днище сужающихся желобов.

Флотоклассификатор по предлагаемому техническому решению с аэраторами на днище сужающегося желоба позволяет при переработке руды «Сафьяновского» месторождения повысить качество медного концентрата в верхнем продукте сужающегося желоба с 17,05 до 17,95% при повышении извлечения меди в него с 43,3 до 57,07%.

**Заключение**

Полученные результаты флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения показывают дополнительные возможности снижения переизмельчения сульфидных руд, получения кондиционного медного концентрата в пенном продукте, а также отвальных хвостов в сливе флотоклассификатора. Данная технология позволит существенно повысить технологические показатели обогащения, сократить фронт последующей флотации и снизить капитальные и эксплуатационные затраты в отделении флотации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Бочаров В. А.* , *Игнаткина В. А.*, *Каюмов А. А.* Теория и практика разделения минералов массивных упорных полиметаллических руд цветных металлов. М.: «Горная книга». 2019. 510 с.
2. Chandramohan, R., Holtham, P. and *Powell M.* The Influence of Particle Shape in Rock Fracture // XXV International Mineral Processing Congress IMPC. 2010). pp. 3163 — 3171.
3. *Бочаров В. А.*, *Манцевич М. И.*, *Скопов Е. В.* Состояние, перспективы развития технологии глубокой и комплексной переработки руд цветных металлов // Горный журнал. 2007. №2. с. 65.
4. *Tomasz P.* Olejnik. Grinding kinetics of selected minerals with reference to the number of contact points // Physicochemical Problems of Mineral Processing, 40 2006. P. 247 — 254.
5 Jankovic, A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills // Minerals Engineering 16. 2003. P. 337 — 345.
6. Tasdemir, A., Ozdag, H., Onal, G. Image analysis of narrow size fractionsobtained by sieve analysis — an evaluation by log-normal distribution and shape factors // Physicochemical Problems of Mineral Processing, 46. 2011. P. 95 — 106.

7. Norazirah, A., *Fuad S. H.* S. and *Hazizan M. H.* M. The Effect of Size and Shape on Breakage Characteristic of Mineral // Procedia Chemistry. Elsevier Ltd., 19. 2016 pp. 702 — 708. doi: 10.1016/j.proche.2016.03.073

8. *Barrios G. K.*P. de Carvalho, R. M. and Tavares, L. M.. Extending breakage characterisation to fine sizes by impact on particle beds // Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 120. 2011. P. 37 — 44.

9. *Хопунов Э. А.* Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии) // Екатеринбург: ООО «УИПЦ». 2013. 429 с.

10. *Чантурия В. А.*, *Шадрунова И. В.*, *Горлова О. Е.* Инновационные процессы глубокой и комплексной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Материалы международной научно-технической конференции «Эффективные технологии производства цветных, редких, благородных металлов». Алматы, 2018. С. 7 — 13.

11. *Шадрунова И. В.*, *Горлова О. Е.*, *Колодежная Е. В.* Принципы построения технологических линий переработки бедного природного и техногенного сырья с использованием центробежно-ударной техники /И. В. Шадрунова, О. Е. Горлова, Е. В. Колодежная // Материалы международной научно-технической конференции «Эффективные технологии производства цвет-ных, редких, благородных металлов». — Алматы, 2018. С. 76 — 81.

12. *Groenveld1 D.*, *Rozou M.* Advanced process control for grinding circuits // XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings IMPC. 2016 — ISBN: 978 — 1-926872 — 29 — 2

13. *Валиева О. С.*, *Интогарова Т. И.*, *Бекчурина Е. А.*, *Морозов Ю. П.* Преимущества применения флотоклассификаторов в замкнутом цикле измельчения // Горный журнал — №2 — 2019. С. 51 — 56.

14. *Бекчурина Е. А.*, *Интогарова Т. И.*, *Абдыкирова Г. Ж.* Предложение по реализации флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения // Материалы международной научно-технической конференции «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов». Алматы. 2018. С. 76 — 81. ГИАБ

## REFERENCES

1. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Kaiumov A. A. *Teoriya i praktika razdeleniya mineralov massivnyh upornyh polimetallicheskih rud cvetnyh metallov* [Theory and practice of separating the minerals of massive refractory polymetallic ore of non-ferrous metal]. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2019. [In Russ]

2. Chandramohan R., Holtham P. and Powell M. The influence of particle shape in rock fracture. XXV International Mineral Processing Congress IMPC. 2010. pp. 3163 — 3171.

3. Bocharov V. A., Mantsevich M. I., Skopov E. V., Viduetskii M. G., Zakharov B. A. State and prospects of development of the technology for deep complex processing of non-ferrous ores. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2007; 2: 65 — 71. [In Russ]

4. Olejnik Tomasz P. Grinding kinetics of selected minerals with reference to the number of contact points. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2006; 40: 247 — 254.

5. Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*. 2003; 16: 337 — 345.

6. Tasdemir A., Ozdag H., Onal G. Image analysis of narrow size fractions obtained by sieve analysis an evaluation by log-normal distribution and shape factors. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2011; 46: 95 — 106.

7. Norazirah A., Fuad S. H. S. and Hazizan M. H. M. The effect of size and shape on breakage characteristic of mineral. *Procedia Chemistry*. 2016; 19: 702 — 708. doi: 10.1016/j.proche.2016.03.073

8. Barrios G. K. P., de Carvalho R. M. and Tavares L. M. Extending breakage characterisation to fine sizes by impact on particle beds. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2011; 120: 37 — 44.

9. Khopunov E. A. *Selektivnoe razrushenie mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya (v obogashchenii i metallurgii)* [Selective disintegration of mineral and technogenic raw material (in processing and metallurgy)]. Ekaterinburg: UIPTs Publishing; 2013. [In Russ]

10. Chanturiia V. A., Shadrunova I. V., Gorlova O. E. Innovative processes of deep and integrated processing of technogenic raw material in the conditions of new economic challenges. In: Effective technologies of non-ferrous, rare, and precious metals production. Proceedings of International Scientific and Production Conference. Almaty: KNRTU Publishing; 2018: 7—13. [In Russ]

11. Shadrunova I. V., Gorlova O. E., Kolodezhnaia E. V. Strategy of processing lines construction of poor natural and technogenic raw material processing with the use of centrifugal impulse engineering. In: Effective technologies of producing non-ferrous, rare, and precious metals: proc. of sci.-to-pract. conf. Almaty; 2018. pp. 76—81. [In Russ]

12. Groenveld1 D., Rozou M. Advanced process control for grinding circuits. XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings IMPC. 2016 ISBN: 978-1-926872-29-2.

13. Valieva O. S., Intogarova T. I., Bekchurina E. A., Morozov Iu. P. Advantages of applying flotation classification in closed grinding circuit. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019; 2: 51—56. [In Russ]

14. Bekchurina E. A., Intogarova T. I., Abdykirova G. Zh. *Predlozhenie po realizacii flotoklassifikacii v zamknutom cikle izmel'cheniya* [Advantages of applying flotation classification in closed grinding circuit]. In: Effective technologies of producing non-ferrous, rare, and precious metals: proc. of sci.-to-pract. conf. Almaty; 2018. P. 76—81. [In Russ]

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Морозов Юрий Петрович*[1] — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых, e-mail: tails2002@inbox.ru;
*Интогарова Татьяна Ивановна*[2] — ст. преподаватель кафедры горного дела;
*Валиева Ольга Сергеевна*[2] — ст. преподаватель кафедры горного дела;
*Битимбаев Марат Жакупович*[3] — докт. техн. наук, профессор;
[1] Уральский государственный горный университет, 620075, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30, Россия;
[2] Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, 678174, р. Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ойунского, д. 14, Россия;
[3] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, 050000, г. Алматы, ул. Сатпаева, д. 22а, Казахстан.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Morozov Yu. P.*[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Mineral Processing Department, e-mail: tails2002@inbox.ru;
*TIntogarova T. I.*[2], Senior Lecturer at the Department of Mining;
*Valieva O. S.*[2], Senior Lecturer at the Department of Mining;
*Bitimbaev M.* Zh.[3], Dr. Sci. (Eng.), Professor;
[1] Ural State Mining University, ul. Kuibysheva 30, Yekaterinburg, 620144 Russia;
[2] Mirny Polytechnic Institute, Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University, ul. Oyunskogo 14, Mirny, 678174 Russia;
[3] Satpayev Kazakh National Research Technical University, ul. Satpayeva 22, Almaty, 050000 Kazakhstan.

Получена редакцией 25.05.2021; получена после рецензии 11.09.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 25.05.2021; received after the review 11.09.2021; accepted for printing 10.10.2021.