

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕПРЕССОРОВ НА ФЛОТОАКТИВНЫЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ ПРИ ФЛОТАЦИИ СУЛЬФИДНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

А. В. Афанасова¹, В. А. Абурова¹, Е. О. Прохорова¹, Е. А. Лушина¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Переработка сульфидных золотосодержащих руд является комплексной задачей ввиду снижения качества рудного сырья, значительного количества в руде флотоактивных порообразующих минеральных фаз, тонкой дисперсной вкрапленности золота в минералы-концентраты и тонкой вкрапленности самих минералов в пустую породу, что делает актуальным вопрос совершенствования существующих технологий. Объектом исследования в работе выбраны упорные тонкодисперсные сульфидные золотосодержащие руды, характеризующиеся также высоким содержанием порообразующих минералов, таких как кальцит и кварц. Анализ протекания процесса флотации позволил установить необходимость использования комбинации депрессоров ввиду высокого извлечения в концентрат порообразующих минералов, как силикатов, так и карбонатов, по причине их высокой флотационной активности. Исследование по подбору депрессора позволило установить, что использование жидкого стекла и КМК низкозамещенного приводит к снижению содержания и извлечения кальция и кремния в концентрат. На основании анализа полученных данных обосновано применение комбинации депрессоров для снижения извлечения порообразующих минералов в концентрат с обоснованными расходами жидкого стекла и КМК низкозамещенного 60 г/т и 55 г/т соответственно.

Ключевые слова: флотация, сульфидные упорные руды, золото, флотоактивные порообразующие минералы, карбоксиметилкрахмал, депрессоры, сульфидный концентрат.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19–17–00096).

Для цитирования: Афанасова А. В., Абурова В. А., Прохорова Е. О., Лушина Е. А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные порообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 161–174. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161.

Investigation of the influence of depressors on flotation-active rock-forming minerals in sulphide gold-bearing ore flotation

A. V. Afanasova¹, V. A. Aburova¹, E. O. Prokhorova¹, E. A. Lushina¹

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: Processing of sulphide gold-bearing ores has significant difficulties due to decrease in quality of ore raw materials, increase in quantity of flotation-active rock-forming mineral

phases in ores, thin disperse gold inclusions in concentrating minerals and thin inclusions of minerals themselves in rock-forming minerals. This makes the question of improvement of existing technologies actual. The main method of beneficiation of this type of ores is flotation methods due to their flexibility in terms of a wide range of reagent regimes and variation of technological parameters which makes it possible to involve ores of various genesis and material composition in processing. Refractory fine sulphide gold-bearing ores, which are also characterized by a high content of rock-forming minerals, were chosen as an object of the research. Analysis of the flotation process has established the need to use a combination of depressors due to the high recovery of rock-forming minerals, both silicates and carbonates, in the concentrate. Research on selection of depressor allowed to establish that the use of liquid glass and KMK leads to decrease in content and extraction of calcium and silicon in the concentrate. Based on the analysis of the data obtained, the use of a combination of depressors to reduce the extraction of rock-forming minerals in the concentrate with justified rates of sodium silicate and KMC 60 g/t and 55 g/t respectively at a set pH equal to 8 was substantiated.

Key words: flotation, sulphide refractory ores, gold, flotation-active gangue minerals, carboxymethylstarch, depressors, sulphide concentrate.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-00096).

For citation: Afanasova A. V., Aburova V. A., Prokhorova E. O., Lushina E. A. Investigation of the influence of depressors on flotation-active rock-forming minerals in sulphide gold-bearing ore flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):161–174. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161.

Введение

Сырьевой комплекс — очень важный элемент мировой экономики [1, 2]. Ввиду истощения запасов легкообогатимого и богатого сырья все больше в переработку вовлекаются бедные и труднообогатимые руды, а также нетрадиционное сырье, в том числе лежалые хвосты, забалансовые руды и черносланцевое сырье разной формации [3,4]. Переработка данных типов сырья осложняется ввиду тонкой дисперсной вкрапленности благороднометаллических включений в минералы-концентраты [5], тонкой вкрапленности минералов-концентратов в пустую породу [6], а также присутствием сорбционно-активных по отношению к благородным металлам в ионной форме углистых и глинистых веществ [7,8]. Осложняется переработка упорного сырья также наличием изоморфных структур, которые могут быть встроены

в кристаллическую решетку минералов-концентратов и изменять их свойства, что усложняет выбор технологии переработки [9], при этом отдельной задачей является обеспечение селективной дезинтеграции сростков минералов, что особенно сильно сказывается на дальнейшем обогащении [10].

Одним из важнейших аспектов совершенствования технологии переработки упорных руд является изучение минералогических и технологических особенностей сырья с целью выявления минеральных примесей [11], минералов-концентратов, особенностей рудной и породообразующей минерализаций [12], которые в совокупности значительно влияют на протекание процессов переработки на стадиях не только обогатительного, но также и металлургического переделов. В работе [13, 14] представлены обзоры крупнейших месторождений благородных металлов в мире и их типизация, стоит отметить

важность оценки благороднометалльных месторождений Арктической зоны [15].

Основным способом обогащения сульфидных благороднометалльных руд являются флотационные методы ввиду их гибкости в плане широкого спектра реагентных режимов и варьирования технологических параметров, что позволяет вовлекать в переработку руды с различным генезисом и вещественным составом [16]. Современные направления в области совершенствования флотационного обогащения направлены на разработку новых методических подходов к оценке процесса флотации сырья [17], изучение структурных свойств пенообразования с применением современных методов машинного зрения [18], моделирование процессов флотации с применением современных программных пакетов [19], создание новых флотационных аппаратов [19], применение различных методов воздействия [20], а также разработку новых реагентных режимов [21, 22] и создание новых флотационных реагентов [23].

Вовлечение в переработку бедных руд с низким содержанием золота и высоким содержанием пустой породы приводит к снижению качества концентратов, их загрязнению пустой породой [23]. Зачастую пустая порода, например карбонаты и силикаты, обладает повышенной флотационной активностью [24], что приводит к ее извлечению в концентрат не только за счет механического выноса [25]. В связи с этим актуальным направлением для исследования является подбор реагентов-депрессоров, обеспечивающих направленное селективное подавление флотоактивной породообразующей минерализации [26], подбор уровня pH, позволяющего дополнительно регулировать флотационные способности минералов [27].

Для депрессии минералов класса силикатов наиболее распространенным

реагентом-депрессором является жидкое стекло, представляющее собой соль поликремниевых кислот [28]. При этом жидкое стекло также оказывает депрессирующее действие на карбонаты, а в избытке способно депрессировать сульфидные минералы [29]. Для депрессии флотоактивной пустой породы существует широкий ряд органических депрессоров [30], однако следует учесть возможность депрессирования данными реагентами рудных минералов. Крахмал и декстрин находят свое применение как реагенты-депрессоры при флотации сульфидных благороднометалльных руд [31]. Следует также учесть важность установления подходящего уровня pH при флотации, например, избыток гидроксид-ионов приведет к депрессии пирита, но для усиления свойств жидкого стекла рекомендуется создание содовой щелочной среды [32].

Таким образом, целью представленной работы было повышение качества сульфидных флотационных концентратов за счет снижения извлечения в них пустой породы путем подбора комбинации селективно-действующих депрессоров.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования в представленной работе были выбраны упорные сульфидные золотосодержащие руды, упорность которых обусловлена тонкой вкрапленностью золота в минералы-концентраторы (рис. 1). Основным ценным компонентом является золото, серебро присутствует как попутный компонент, отдельно при этом не извлекается. Золото ассоциировано преимущественно с пиритом и арсенопиритом.

Породообразующая минерализация представлена преимущественно кварцем, кальцитом, плагиоклазом, мусковитом, биотитом и турмалином. Содер-

Таблица 1

Элементный состав исследуемых образцов руды
Elemental composition of the investigated ore

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Ca	36,86±1,84	As	0,42±0,02	K	1,01±0,05
Si	12,84±0,64	Sb	0,09±0,01	Mn	0,909±0,045
Fe	6,98±0,35	Ti	0,87±0,04	Sr	0,087±0,004
S	0,86±0,04	Al	1,16±0,06	Cu	0,070±0,003

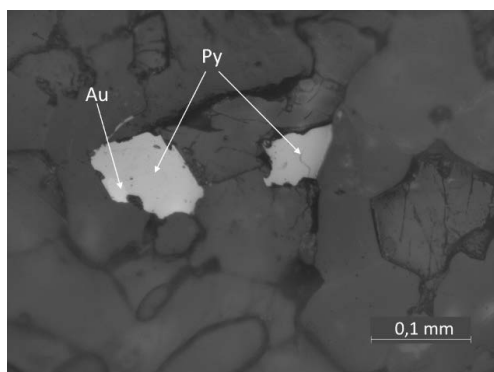


Рис. 1. Вкрапленность золота в пирите (анишлифы образцов исследуемой руды)

Fig. 1. Gold dissemination in pyrite (polished section of the investigated ore)

жание золота в руде при этом составляет порядка 5 г/т [33].

Элементный состав проб руды исследуемого месторождения представлен в табл. 1. Анализ элементного состава проводился с применением калибровочных образцов на рентгенофлуоресцентном анализаторе EDX 7000 фирмы Schimadzu, методом оксидов с дальнейшим пересчетом на элементы.

Элементы, по которым в дальнейшем ведется процесс расчета показателей обогащения, выделены: элементы Ca и Si — как основные элементы-индикаторы пустой породы (кальцита, кварца и др); As, Fe и S — как основные элементы-индикаторы для рудной минерализации пирита и арсенипирита. Подготовка проб к флотационному обогащению проводилась посредством измельчения руды в лабо-

раторной мельнице МШЛ-1л, анализ гранулометрического состава проводился с применением лабораторного вибрационного встряхивателя фирмы Laarmann. Для подготовки проб использовано мокрое измельчения со следующими режимными параметрами: соотношение Т: Ж составляло 1:2, степень заполнения мельницы шарами — 40%, частота оборотов 110 об/мин, время измельчения 10 минут, что позволяет получить крупность питания для стадии флотации 55% класса –71 мкм. Эксперименты по флотационному обогащению проводились на лабораторной пневмомеханической флотационной машине Flotation Bench Test Machine фирмы Laarmann с объемом камеры 1,5 л. В качестве депрессоров для подавления флотоактивной пустой породы были выбраны следующие депрессоры: натриевое жидкое стекло, КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза — целлюлозогликолевая кислота, производное целлюлозы, в которой карбоксилметильная группа (–CH₂–COOH) соединяется гидроксильными группами глюкозных мономеров), декстрин белый кукурузный (полисахарид, получаемый термической обработкой кукурузного крахмала), органические депрессоры натриевый карбоксиметилкрахмал низко- и высокозамещенные, низкомолекулярные депрессоры класса тионокрбаматы DP-101 и DP-102, органические депрессоры FD-4 и FD-5, а также депрессор гексаметафосфат натрия GF-1 при равных расходах. Продукты

флотационного обогащения подвергались сушке, взвешиванию и анализу методом РФА на рентгенофлуоресцентном анализаторе EDX 7000 Schimadzu с использованием калибровочных зависимостей, построенных по результатам аналитического химического контроля фаз и элементов.

Результаты и обсуждения

Опыты по флотационному обогащению исследуемых образцов были проведены на естественном уровне рН пульпы, равном 7,41–7,60, без депрессора, с использованием комбинации собирателей (бутилового ксантогената калия и изобутилового натриевого аэрофлота при соотношении 2:1) с расходом 150 г/т и вспенивателя МИБК с расходом 80 г/т. Время флотации составило 5 минут. Результаты представлены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает достаточно высокую флотационную активность породообразующей минерализации, содержание и извлечение в концентрат для кремния составляет 13,44% и 14,68% соответственно, для кальция 34,16% и 12,99% соответственно. Высокая флотоактивность силикатов и карбонатов в данном случае обуславливается не только механическим выносом пустой породы [34].

Было проведено исследование распада исходной навески для флотационного обогащения на ситах 71, 40 и 20 мкм для определения распределения элементов в тонкие классы крупности (табл. 3).

Крупность питания для стадии флотации составляет 55% класса –71 мкм, что было обосновано ввиду необходимости измельчения руды до крупности 50–60% для стадии основной флотации.

Таблица 2

Результаты флотационного обогащения образцов исходной руды Results of flotation of ore samples

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат	14,02	16,64	34,16	13,44	5,39	2,550
Хвосты	85,98	5,40	37,30	12,74	0,12	0,073
Исх. руда	100,00	6,98	36,86	12,84	0,86	0,420
Наименование продукта		Извлечение, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат		33,42	12,99	14,68	87,87	85,12
Хвосты		66,58	87,01	85,32	12,13	14,88
Исх. руда		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Таблица 3

Результаты исследования распределения кальция, кремния и мышьяка по классам крупности Results of calcium, silica and arsenic distribution by size classes

Класс крупности	Выход класса, %	Распределение, %		
		Ca	Si	As
+71 мкм	30,97	27,10	36,10	22,66
-71+40 мкм	23,71	19,17	30,24	23,74
-40+20 мкм	11,52	11,90	10,34	19,29
-20+0 мкм	33,8	41,82	23,32	34,31
Итого:	100	100	100	100

Это согласуется с данными по крупности питания флотации для данного типа сырья и достаточным переходом элементов рудных минералов в класс -71 мкм (более 90%), что позволит их перевести в пенный продукт. Интерпретация данных, представленных в табл. 3, показывает, что образцы исследуемых руд склонны к ошламованием в процессе измельчения, так как выход класса $-20+0$ мкм составляет 33,8%. При этом следует отметить, что арсенопирит, также имеющий склонность к ошламованием, имеет высокое распределение в самый мелкий класс, равное 34,31%, что не позволяет использовать обесшламливание по тонким классам для снижения извлечения в концентрат пустой породы ввиду потерь арсенопирита, а следовательно, и потерь золота с ним.

Основным способом снизить извлечение пустой породы в концентрат, при этом не снижая извлечения ценных компонентов, является добавление депрессора. Было исследовано влияние на процесс флотации следующих депрессоров: натриевое жидкое стекло, КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза), декстрин, органические депрессоры натриевый карбоксиметилкрахмал низко- и высокозамещенные, низкомолекулярные депрессоры класса тионокарбаматы DP-101 и DP-102, органические депрессоры FD-4 и FD-5, а также депрессор гексаметафосфат натрия GF-1 при равных расходах. Результаты исследования представлены на рис. 2, 3.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что большая часть депрессоров достаточно сильно депрессирует арсенопирит, что не позволяет использовать их при флотации данных руд. Получено, что натриевое жидкое стекло и натриевый КМК низкозамещенный не депрессируют в исследуемых условиях арсенопирит.

Интерпретация данных, представленных на рис. 3, показывает, что использование жидкого стекла и КМК низкозамещенного приводит к снижению содержания и извлечения кальция и кремния в концентрат. При этом стоит отметить, что жидкое стекло более сильно депрессирует кремниевые минералы, представленные в исследуемых рудах преимущественно кварцем, что подтверждается существующими исследованиями [30, 31]. Содержание и извлечение кремния в концентрат при этом составляет 9,56% и 9,38% соответственно. КМК (нз) при этом сильнее депрессирует кальциевые минералы, в данных рудах представленные преимущественно кальцитом. Содержание и извлечение кальция в концентрат в этом случае составляет 28,33% и 11,70% соответственно. На основании анализа полученных данных предложено применение комбинации депрессоров для снижения извлечения породообразующих минералов в концентрат.

Для минимизации извлечения и содержания кальция и кремния в сульфидный концентрат был использован факторный план эксперимента, при этом факторами были выбраны расход натриевого жидкого стекла и расход натриевого КМК низкозамещенного, что позволит исследовать их синергетический эффект и обосновать расходы. Для исследования выбраны три уровня варьирования факторов -1 , 0 и $+1$, соответствующие расходам депрессоров 25 г/т, 50 г/т и 75 г/т. Результаты исследования представлены на рис. 4.

Интерпретация результатов (см. рис. 4) позволяет установить положительное совокупное влияние депрессоров: натриевого КМК низкозамещенного и жидкого стекла на снижение содержания в концентрате кремния и кальция. В результате исследования установ-

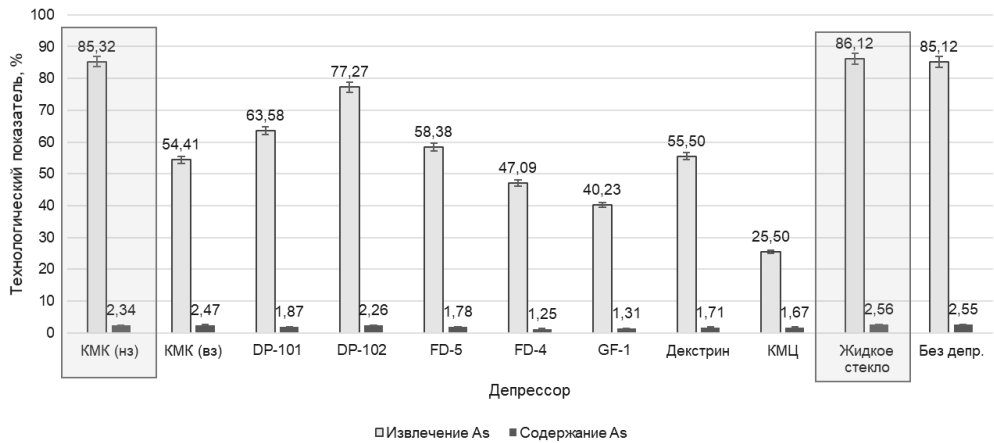


Рис. 2. Результаты исследования влияния депрессоров на содержание и извлечение арсенопирита в концентрат

Fig. 2. The results of a depressor effect investigation on the grade and recovery of arsenopyrite in the concentrate

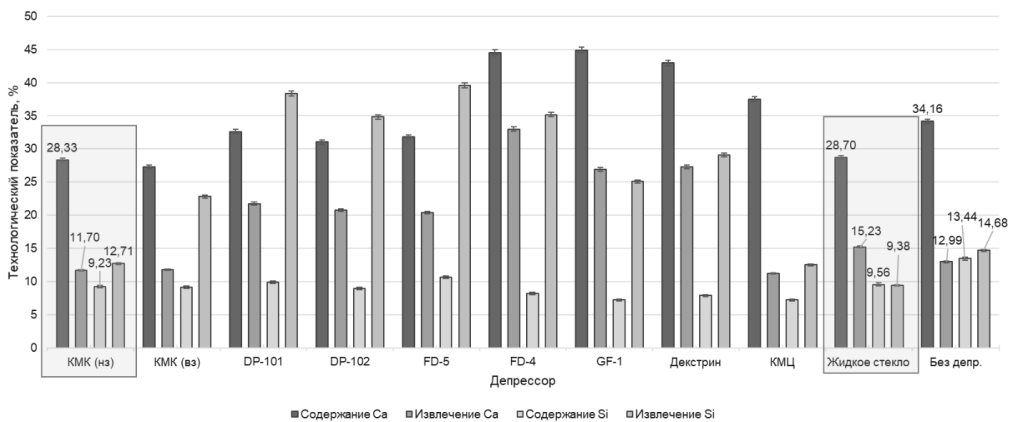


Рис. 3. Результаты исследования влияния депрессоров на содержание и извлечение кальция и кремния в концентрат

Fig. 3. The results of a depressor effect investigation on the grade and recovery of calcium and silica in the concentrate

лено, что для получения минимального извлечения кремния и кальция в концентрат необходим расход жидкого стекла составляет 60 г/т, расход КМК составляет 55 г/т.

Получены адекватные математически модели, позволяющие прогнозировать содержание кальция и кремния в концентрате от варьируемых факторов в исследуемом диапазоне:

$$\beta_{Si} = 8,08 + 0,7A - 0,15B + 0,27AB + 1,37A^2 + 0,12B^2,$$

$$\beta_{Ca} = 24,28 + 1,1A - 0,46B + 0,13AB + 1,52A^2 + 0,63B^2,$$

где β_{Si} – содержание Si в концентрате сульфидной флотации,%; β_{Ca} – содержание Ca в концентрате сульфидной флотации,%; A – уровень фактора –

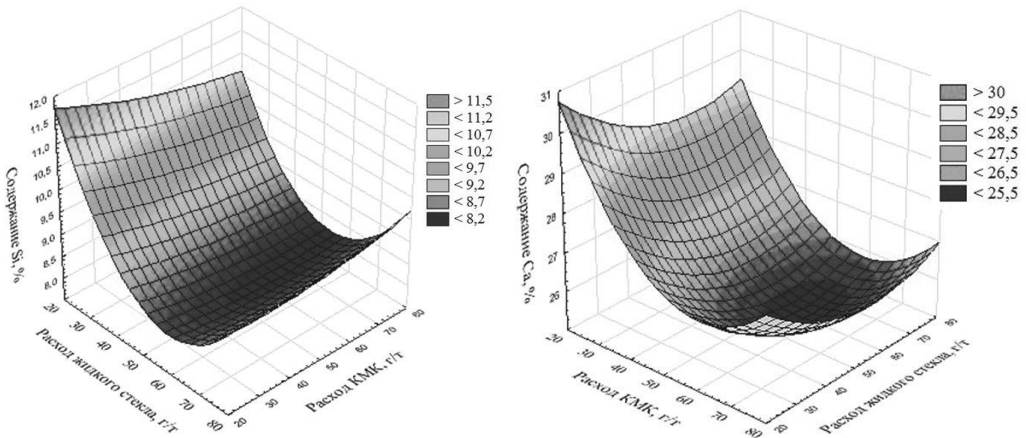


Рис. 4. Результаты исследования совокупного влияния расходов жидкого стекла и КМК (нз) на содержание в концентрате кремния и кальция

Fig. 4. Results of the combined effect of sodium silicate and carboxymethyl starch consumption on the silica and calcium content in the concentrate

Таблица 4

Результаты заверочных опытов флотационного обогащения на обоснованном реагентном режиме

Results of verification experiments of flotation on a justified reagent regime

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат	12,03	15,66	24,19	8,03	6,33	2,950
Хвосты	87,97	5,79	38,59	13,50	0,11	0,074
Исх. руда	100,00	6,98	36,86	12,84	0,86	0,420
Наименование продукта		Извлечение, %				
		Fe	Ca	Si	S	As
Концентрат		26,99	7,89	7,52	88,55	84,50
Хвосты		73,01	92,11	92,48	11,45	15,50
Исх. руда		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

расход жидкого стекла, г/т; B — уровень фактора — расход КМК (нз), г/т.

На обоснованном реагентном режиме проведена серия заверочных опытов. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Анализ данных, представленных в табл. 4, показывает, что по сравнению с опытами без применения депрессора (см. табл. 2) наблюдается снижение извлечения кремния в концентрат на 7,15%, извлечения кальция на 5,10%. На рис. 5

представлен характерный вид флотационного сульфидного концентрата.

Анализ результатов полученных исследований позволяет установить параметры процесса флотационного обогащения тонкодисперсных сульфидных золотосодержащих руд на основе совокупного депрессирующего действия комбинации депрессоров натриевого КМК низкозамещенного и натриевого жидкого стекла с обоснованными расходами 55 г/т и 60 г/т соответственно, за счет снижения

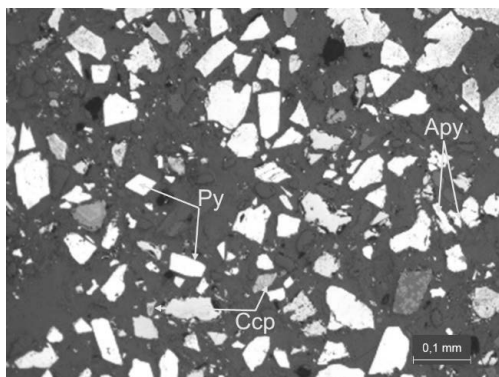


Рис. 5. Характерный вид флотационного сульфидного концентрата (P_y – пирит, A_{py} – арсенопирит, C_{cp} – халькопирит)
 Fig. 5. Flotation sulphide concentrate

извлечения породобразующих минералов, а именно карбонатов и кварца, что позволит сократить в дальнейшем количество перечистных операций и повысить качество концентрата.

Заключение

В результате проведенного исследования обоснованы параметры процесса флотационного обогащения тонковкрапленных сульфидных руд для повышения качества концентрата за счет уменьшения извлечения породобразующих минералов в концентрат. Исследование по подбору депрессора позволило установить, что использование жидкого стекла и КМК низкозамещенного приводит к снижению содержания и извлечения кальция и кремния в концентрат. При этом стоит отметить, что жидкое стекло более сильно депрессирует кремниевые минералы, представленные в исследуемых рудах преимущественно кварцем. КМК (нз) при этом сильнее депресси-

рует кальциевые минералы, в данных рудах представленные преимущественно кальцитом. На основании анализа полученных данных обосновано применение комбинации депрессоров для снижения извлечения породобразующих минералов в концентрат. Получены адекватные математические модели, позволяющие прогнозировать содержание кальция и кремния в концентрате для варьируемых параметров в исследуемых диапазонах. С применением факторного планирования эксперимента обосновано совокупное депрессирующее действие комбинации депрессоров натриевого КМК низкозамещенного и натриевого жидкого стекла с обоснованными расходами 55 г/т и 60 г/т соответственно. Применение комбинации депрессоров позволяет повысить качество концентрата, снижая в нем долю пустой породы.

Вклад авторов

Афанасова А. В. — разработка концепции исследования, постановка цели и задач исследования; интерпретация полученных результатов и написание текста статьи;

Абурова В. А. — проведение экспериментальных исследований по флотационному обогащению сырья, минералогические исследования исходной руды;

Прохорова Е. О. — проведение экспериментальных исследований по замеру краевого угла смачивания, минералогические исследования продуктов обогащения;

Лушина Е. А. — проведение опытов по определению гранулометрического и элементного состава сырья.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Litvinenko V. S., Sergeev I. B.* Innovations as a Factor in the Development of the Natural Resources Sector // Studies on Russian Economic Development. 2019, vol. 30, no. 6, pp. 637–645. DOI: 10.1134/S107570071906011X.

2. Литвиненко В. С., Сергеев И. Б. Инновационное развитие минерально-сырьевого сектора // Проблемы прогнозирования. — 2019. — № 6. — С. 60–72.
3. Игнаткина В. А., Макавецкас А. Р., Каюмов А. А., Аксенова Д. Д. Анализ причин ухудшения технологических показателей флотации медьсодержащей сульфидной руды при камерной отработке медно-колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_5.
4. Polezhaev S. Y., Cheremisina O. V. Complex processing technology of gold-bearing concentrates: Autoclave leaching with subsequent roasting // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015, vol. 56, no. 4, pp. 404–408. DOI: 10.3103/S1067821215040185.
5. Lazarenkov V. G., Tikhomirov I. N., Zhidkov A. Y., Talovina I. V. Platinum group metals and gold in supergene nickel ores of the Moa and Nikaro deposits (Cuba) // Lithology and Mineral Resources. 2005, vol. 40, no. 6, pp. 521–527. DOI: 10.1007/s10987-005-0049-1.
6. Меретуков М. А. Природные наноразмерные частицы золота // Цветные металлы. — 2006. — № 2. — С. 36–41.
7. Александрова Т. Н., Цыплаков В. Н., Ромашев А. О., Семенихин Д. Н. Удаление сорбционно-активных углеродистых веществ из упорных золотосульфидных руд и концентратов месторождения «Майское» // Обогащение руд. — 2015. — № 4. — С. 3–7. DOI: 10.17580/or.2015.04.01.
8. Захаров Б. А., Меретуков М. А. Золото: упорные руды. — М.: ИД «Руда и Металлы», 2013. — 452 с.
9. Новаков Р. М., Кунгурова В. Е., Москалева С. В. Условия образования благороднометальной минерализации в сульфидных кобальт-медно-никелевых рудах Камчатки (на примере рудопоявления Аннабергитовая щель) // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 209–222. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5.
10. Aleksandrova T., Nikolaeva, N., Lieberwirth, H., Aleksandrov, A. Selective desintegration and concentration: theory and practice // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences. 2018, vol. 56, 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/20185603001.
11. Артемьев Д. С., Крымский Р. Ш., Беляцкий Б. В., Ашихмин Д. С. Возраст оруденения Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка): результаты Re-Os изотопного датирования // Записки Горного института. — 2020. — Т. 243. — С. 266–278. DOI: 10.31897/pmi.2020.3.266.
12. Kirjavainen V. M. Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals // International journal of mineral processing. 1996, vol. 46, no. 1–2, pp. 21–34. DOI: 10.1016/0301-7516(95)00057-7.
13. O'Connor C., Alexandrova T. The geological occurrence, mineralogy, and processing by flotation of platinum group minerals (PGMs) in South Africa and Russia // Minerals. 2021, vol. 11, no. 1, p. 54. DOI: 10.3390/min11010054.
14. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 218–227. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.218.
15. Aleksandrova T. N., Talovina I. V., Duryagina A. M. Gold-sulphide deposits of the Russian Arctic zone: Mineralogical features and prospects of ore beneficiation // Geochemistry. 2020, vol. 80, no. 3, 125510. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.006.
16. Матвеева Т. Н., Чантурия В. А., Гетман В. В., Каркешкина А. Ю., Громова Н. К. Применение нового композиционного реагента для флотационного выделения целевых минералов в коллективный медно-молибденовый концентрат // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11. — С. 80–94. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_80.
17. Александрова Т. Н., Ромашев А. О., Кузнецов В. В. Развитие методического подхода к определению флотационной способности тонковкрапленных сульфидов // Обогащение руд. — 2020. — Т. 2. — С. 9–14. DOI: 10.17580/or.2020.02.02.

18. *Islamov S., Grigoriev A., Beloglazov I., Savchenkov S., Gudmestad O. T.* Research risk factors in monitoring well drilling – A case study using machine learning methods // *Symmetry*. 2021, vol. 13, no. 7, 1293. DOI: 10.3390/sym13071293.

19. *Newcombe B., Akerstrom B., Jaques E.* The effect of rotor speed on the flash flotation performance of Au and Cu in an industrial concentrator // *Minerals Engineering*. 2018, vol. 124, pp. 28–43. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.020.

20. *Киореску А. В.* Интенсификация бактериально-химического выщелачивания никеля, меди и кобальта из сульфидной руды с применением микроволнового излучения // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 239. – С. 528–535. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.528.

21. *Жаролла Н. Д., Ергешев А. Р., Игнаткина В. А.* Оценка селективности действия сульфгидрильных собирателей на основе дитиофосфатов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 11. – С. 14–26. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-14-26.

22. *Юшина Т. И., Малышев О. А., Щелкунов С. А.* Флотация золотосодержащих руд цветных металлов с применением реагентов на основе ацетиленовых спиртов // *Цветные металлы*. – 2017. – № 2. – С. 13–19. DOI: 10.17580/tsm.2017.02.01.

23. *Лавриненко А. А., Макаров Д. В., Шрадер Э. А., Саркисова Л. М.* Повышение селективности разделения сульфидов и флотоактивных силикатов при обогащении малосульфидной платинометаллической руды // *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья*. – 2019. – С. 112–116.

24. *Кузнецова И. Н., Лавриненко А. А., Шрадер Э. А., Саркисова Л. М.* Снижение извлечения флотоактивных силикатов в коллективный концентрат при флотации малосульфидной платинометаллической руды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 5. – С. 200–208. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-200-208.

25. *Yang B., Yin W., Zhu Z., Wang D., Han H., Fu Y., Sun H., Chu F., Yao J.* A new model for the degree of entrainment in froth flotation based on mineral particle characteristics // *Powder Technology*. 2019, vol. 354, pp. 358–368. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.017.

26. *Deng J., Yang S., Liu C., Li H.* Effects of the calcite on quartz flotation using the reagent scheme of starch/dodecylamine // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, vol. 583, 123983. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123983.

27. *Шумилова Л. В., Костикова О. С.* Сульфидизация серебро-полиметаллических руд месторождения «Гольцовое» для снижения потерь серебра с хвостами обогащения // *Записки Горного института*. – 2018. – Т. 230. – С. 160–166. DOI: 10.25515/pmi.2018.2.160.

28. *Брагин В. И., Бурдакова Е. А., Усманова Н. Ф., Кинякин А. И.* Комплексная оценка флотационных реагентов по их влиянию на потери металлов и селективность флотации // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2021. – Т. 27. – № 5. – С. 4–12. DOI: 10.17073/0021-3438-2021-5-4-12.

29. *Чантурия В. А., Матвеева Т. Н., Иванова Т. А., Громова Н. К., Ланцова Л. Б.* Исследование новых комплексообразующих реагентов для селекции золотосодержащих пирита и арсенопирита // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2011. – № 1. – С. 81–89. DOI: 10.1134/S1062739147010126.


30. *Pugh R. J.* Macromolecular organic depressants in sulphide flotation – A review, 1. Principles, types and applications // *International Journal of Mineral Processing*. 1989, vol. 25, no. 1–2, pp. 101–130. DOI: 10.1016/0301-7516(89)90059-8.

31. *Pugh R. J.* Macromolecular organic depressants in sulphide flotation – A review, 2. Theoretical analysis of the forces involved in the depressant action // *International Journal of Mineral Processing*. 1989, vol. 25, no. 1–2, pp. 131–146. DOI: 10.1016/0301-7516(89)90060-4.

32. *Caio M., Liu Q.* Reexamining the functions of zinc sulfate as a selective depressant in differential sulfide flotation – The role of coagulation // *Journal of colloid and interface science*. 2006, vol. 301, no. 2, pp. 523–531. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.05.036.

33. Сазонов А. М., Звягина Е. А., Сильянов С. А., Лобанов К. В., Леонтьев С. И., Калинин Ю. А., Савичев А. А., Тишин П. А. Рудогенез месторождения золота Олимпиада (Енисейский край, Россия) // Геосферные исследования. – 2019. – № 1. – С. 17–43. DOI: 10.17223/25421379/9/2.

34. Neethling S. J., Cilliers J. J. The entrainment of gangue into a flotation froth // International Journal of Mineral Processing. 2002, vol. 64, no. 2–3, pp. 123–134. DOI:10.1016/S0301-7516(01)00067-9.

35. Ahmadi M., Gharabaghi M., Abdollahi H. Effects of type and dosages of organic depressants on pyrite floatability in microflotation system // Advanced Powder Technology. 2018, vol. 29, no. 12, pp. 3155–3162. DOI: 10.1016/j.apt.2018.08.015. 

REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Sergeev I. B. Innovations as a Factor in the Development of the Natural Resources Sector. *Studies on Russian Economic Development*. 2019, vol. 30, no. 6, pp. 637–645. DOI: 10.1134/S107570071906011X.

2. Litvinenko V. S., Sergeev I. B. Innovative development of the mineral resource sector. *Problems of Forecasting*. 2019, no. 6, pp. 60–72. [In Russ].

3. Ignatkina V. A., Makavetskas A. R., Kayumov A. A., Aksenova D. D. Analysis of causes of deterioration of technological indicators of flotation of copper-bearing sulfide ore during chamber mining of copper-pyrite deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 5–22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_5.

4. Polezhaev S. Y., Cheremisina O. V. Complex processing technology of gold-bearing concentrates: Autoclave leaching with subsequent roasting. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2015, vol. 56, no. 4, pp. 404–408. DOI: 10.3103/S1067821215040185.

5. Lazarenkov V. G., Tikhomirov I. N., Zhidkov A. Y., Talovina I. V. Platinum group metals and gold in supergene nickel ores of the Moa and Nikaro deposits (Cuba). *Lithology and Mineral Resources*. 2005, vol. 40, no. 6, pp. 521–527. DOI: 10.1007/s10987-005-0049-1.

6. Meretukov M. A. Natural nanoparticles of gold. *Tsvetnye Metaly*. 2006, no. 2, pp. 36–41. [In Russ].

7. Aleksandrova T. N., Cyplakov V. N., Romashev A. O., Semenihihin D. N. Removal of sorption-active carbonaceous substances from refractory gold-sulphide ores and concentrates of Mayskoye deposit. *Obogashchenie rud*. 2015, no. 4, pp. 3–7. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2015.04.01.

8. Zakharov B. A., Meretukov M. A. Gold: refractory ores. Moscow, *Ore and metals Publishing House*, 2013, 452 p. [In Russ].

9. Novakov R. M., Kungurova V. E., Moskaleva S. V. Conditions of noble-metal mineralization formation in cobalt-copper-nickel sulphide ores of Kamchatka (by the example of annabergitovaya slit ore occurrence). *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 209–222. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.5.

10. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Lieberwirth H., Aleksandrov A. Selective disintegration and concentration: theory and practice. *E3S Web of Conferences*. – *EDP Sciences*. 2018, vol. 56, 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/20185603001.

11. Artemiev D. S., Krymskij R. SH., Belyackij B. V., Ashihmin D. S. The age of mineralization of Mayskoe gold ore deposit (Central Chukotka): results of Re-Os isotopic dating. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 243, pp. 266–278. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.3.266.

12. Kirjavainen V. M. Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals. *International journal of mineral processing*. 1996, vol. 46, no. 1–2, pp. 21–34. DOI: 10.1016/0301-7516(95)00057-7.

13. O'Connor C., Alexandrova T. The geological occurrence, mineralogy, and processing by flotation of platinum group minerals (PGMs) in South Africa and Russia. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 1, p. 54. DOI: 10.3390/min11010054.

14. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Study of enrichment of sulphide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan Shield. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 218–227. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.218.
15. Aleksandrova T. N., Talovina I. V., Duryagina A. M. Gold-sulphide deposits of the Russian Arctic zone: Mineralogical features and prospects of ore beneficiation. *Geochemistry*. 2020, vol. 80, no. 3, 125510. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.006.
16. Matveeva T. N., Chanturiya V. A., Getman V. V., Karkeshkina A. Yu, Gromova N. K. Application of new composite reagent for flotation separation of target minerals in collective copper-molybdenum concentrate. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 80–94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_80.
17. Aleksandrova T. N., Romashev A. O., Kuznecov V. V. Development of methodical approach to determination of flotation ability of thin-encrusted sulphides. *Obogashchenie rud*. 2020, vol. 2, pp. 9–14. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2020.02.02.
18. Islamov S., Grigoriev A., Beloglazov I., Savchenkov S., Gudmestad O. T. Research risk factors in monitoring well drilling – A case study using machine learning methods. *Symmetry*. 2021, vol. 13, no. 7, 1293. DOI: 10.3390/sym13071293.
19. Newcombe B., Akerstrom B., Jaques E. The effect of rotor speed on the flash flotation performance of Au and Cu in an industrial concentrator. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 124, pp. 28–43. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.020.
20. Kioresku A. V. Intensification of Bacterial-Chemical Leaching of Nickel, Copper and Cobalt from Sulfide Ores Using Microwave Radiation. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 528–535. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.528.
21. Zharolla N. D., Ergeshev A. R., Ignatkina V. A. Estimation of selectivity of sulphhydryl collectors on a dithiophosphate basis. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11, pp. 14–26. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493–2020–11–0–14–26.
22. Yushina T. I., Malyshev O. A., Shchelkunov S. A. Flotation of gold-bearing ores of non-ferrous metals using acetylene-based reagents. *Tsvetnye Metally*. 2017, no. 2, pp. 13–19. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2017.02.
23. Lavrinenko A. A., Makarov D. V., Shrader E. A., Sarkisova L. M. Enhancing selectivity of sulphide and flotation silicate separation during enrichment of low-sulphide platinum-metal ore. *Scientific basis and practice of ore and technogenic raw material processing*. 2019, pp. 112–116. [In Russ].
24. Kuznecova I. N., Lavrinenko A. A., Shrader E. A., Sarkisova L. M. Reduction of flotation silicates extraction into the collective concentrate during flotation of low-sulfide platinum-metal ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 200–208. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493–2019–05–0–200–208.
25. Yang B., Yin W., Zhu Z., Wang D., Han H., Fu Y., Sun H., Chu F., Yao J. A new model for the degree of entrainment in froth flotation based on mineral particle characteristics. *Powder Technology*. 2019, vol. 354, pp. 358–368. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.017.
26. Deng J., Yang S., Liu C., Li H. Effects of the calcite on quartz flotation using the reagent scheme of starch/dodecylamine. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019, vol. 583, 123983. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123983.
27. Shumilova L. V., Kostikova O. S. Sulfidization of silver-polymetallic ores of «Goltsovoe» deposit for decreasing loss of silver in mill tailings. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 230, pp. 160–166. [In Russ]. DOI: 10.25515/pmi.2018.2.160.
28. Bragin V. I., Burdakova E. A., Usmanova N. F., Kinyakin A. I. Comprehensive assessment of flotation reagents by their influence on metal losses and flotation selectivity. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 27, no. 5, pp. 4–12. [In Russ]. DOI: 10.17073/0021–3438–2021–5–4–12.
29. Chanturia V. A., Matveeva T. N., Ivanova T. A., Gromova N. K., Lantsova L. B. New complexing agents to select auriferous pyrite and arsenopyrite. *Journal of Mining Science*. 2011, no. 1, pp. 81–89. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739147010126.

30. Pugh R. J. Macromolecular organic depressants in sulphide flotation — A review, 1. Principles, types and applications. *International Journal of Mineral Processing*. 1989, vol. 25, no. 1–2, pp. 101–130. DOI: 10.1016/0301-7516(89)90059-8.

31. Pugh R. J. Macromolecular organic depressants in sulphide flotation — A review, 2. Theoretical analysis of the forces involved in the depressant action. *International Journal of Mineral Processing*. 1989, vol. 25, no. 1–2, pp. 131–146. DOI: 10.1016/0301-7516(89)90060-4.

32. Cao M., Liu Q. Reexamining the functions of zinc sulfate as a selective depressant in differential sulfide flotation — The role of coagulation. *Journal of colloid and interface science*. 2006, vol. 301, no. 2, pp. 523–531. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.05.036.

33. Sazonov A. M., Zvyagina E. A., Silyanov S. A., Lobanov K. V., Leontev S. I., Kalinin Y. A., Savichev A. A., Tishin P. A. Ore genesis of the Olimpiada gold deposit (Yenisei ridge, Russia). *Geosphere Studies*. 2019, no. 1, pp. 17–43. [In Russ]. DOI: 10.17223/25421379/9/2.

34. Neethling S. J., Cilliers J. J. The entrainment of gangue into a flotation froth. *International Journal of Mineral Processing*. 2002, vol. 64, no. 2–3, pp. 123–134. DOI: 10.1016/S0301-7516(01)00067-9.

35. Ahmadi M., Gharabaghi M., Abdollahi H. Effects of type and dosages of organic depressants on pyrite floatability in microflotation system. *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, no. 12, pp. 3155–3162. DOI: 10.1016/j.apt.2018.08.015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Афанасова Анастасия Валерьевна*¹ — канд. техн. наук, ассистент кафедры обогащения полезных ископаемых, <https://orcid.org/0000-0002-8451-2489>, e-mail: afanasya_av@pers.spmi.ru; afanasyaop-10@yandex.ru;

*Абурова Валерия Александровна*¹ — студент кафедры обогащения полезных ископаемых, e-mail: s161043@stud.spmi.ru;

*Прохорова Евгения Олеговна*¹ — студент кафедры обогащения полезных ископаемых, e-mail: s161028@stud.spmi.ru;

*Лушина Екатерина Александровна*¹ — студент кафедры обогащения полезных ископаемых, e-mail: s171646@stud.spmi.ru;

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2, Россия.

Для контактов: *Афанасова Анастасия Валерьевна*, e-mail: afanasyaop-10@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Afanasya A. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor at the department of mineral processing, <https://orcid.org/0000-0002-8451-2489>, afanasyaop-10@yandex.ru;

*Aburova V. A.*¹, student at the department of mineral processing, e-mail: s161043@stud.spmi.ru;

*Prokhorova E. O.*¹, student at the department of mineral processing, e-mail: s161028@stud.spmi.ru;

*Lushina E. A.*¹, student at the department of mineral processing, e-mail: s171646@stud.spmi.ru;

¹ St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line d.2, Russia.

For contact: *Afanasya Anastasia Valerievna*, e-mail: afanasyaop-10@yandex.ru

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 21.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 21.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.