

УДК 622.765

**Копылова Александра Евгеньевна**  
младший научный сотрудник, аспирант,  
Хабаровский федеральный исследовательский  
центр Дальневосточного отделения РАН,  
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51  
e-mail: [gustavkat@mail.ru](mailto:gustavkat@mail.ru)

**Прохоров Константин Валерьевич**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Хабаровский федеральный исследовательский  
центр Дальневосточного отделения РАН  
e-mail: [kostyan1986\\_ne@mail.ru](mailto:kostyan1986_ne@mail.ru)

### **ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ХВОСТОВ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОЙ ПНЕВМО-ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИИ**

*Аннотация:*

Актуальными остаются вопросы интенсификации и повышения эффективности технологий переработки техногенного минерального сырья. Одним из возможных путей улучшения действующих методов переработки хвостохранилищ является направленное создание обогащенных золотом участков с последующей их переработкой методами выщелачивания. Предварительная концентрация техногенного геоматериала возможна за счет электрохимических и энергетических воздействий на сбросные пульпы. Окончательное извлечение ценных компонентов из обогащенных зон хвостохранилищ может осуществляться методами выщелачивания на меньших объемах материала. Проведены исследования возможности переработки флотационных хвостов золото-серебряной руды месторождения Киранкан. Исследованы способы интенсификации процессов флотационного обогащения золотосодержащих флотационных хвостов путем обработки материала ультразвуковым воздействием, предварительной электрохимической обработки растворов для приготовления пульпы и их совместное использование. Применение католита и анолита существенно увеличивает показатели извлечения золота и серебра в концентраты – на 14,2 и 10,5 %, соответственно. Комбинация ультразвуковых и электрохимических воздействий на флотационную пульпу значительно повышает эффективность переработки. По результатам химического анализа ультразвуковая обработка повышает показатели извлечения золота на 25,3 %, серебра – на 16,8 %, по сравнению со стандартной флотацией. Применение ультразвуковых воздействий на пульпу позволяет диспергировать растворенный водород до уровня микропузырьков с высокой удельной энергией окружающих их пленок воды. Полученными результатами обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования комбинированной пневмо- и электрофлотации в комбинации с ультразвуковой обработкой пульпы при переработке флотационных хвостов золото-кварцевой руды.

*Ключевые слова:* переработка хвостов, переработка техногенных месторождений, извлечение золота, ультразвуковая обработка, электрохимическая обработка, электрофлотация, католит, комбинированная флотация.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.014

**Kopylova Aleksandra E.**  
Postgraduate Student, Junior Researcher,  
Mining Institute, Far-East Branch of RAS,  
680000 Khabarovsk, 51 Turgenev Str.  
e-mail: [gustavkat@mail.ru](mailto:gustavkat@mail.ru)

**Prokhorov Konstantin V.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Leading Researcher,  
Mining Institute, Far-East Branch of RAS  
e-mail: [kostyan1986\\_ne@mail.ru](mailto:kostyan1986_ne@mail.ru)

### **APPLICATION OF ULTRASONIC IMPACTS IN THE PROCESSING OF GOLD-CONTAINING TAILINGS BY COMBINED PNEUMATIC-ELECTRIC FLOTATION**

*Abstract:*

The issues of intensification and of increasing the efficiency of technologies for processing technogenic mineral raw materials remain topical. One of the possible ways to improve the existing methods of tailings processing is directed creation of gold-enriched areas, with their subsequent processing by leaching methods. Preliminary concentration of the technogenic geomaterial is possible due to electrochemical and energetic impacts on the discharge pulps. Final extraction of valuable components from the enriched zones of tailings can be carried out by leaching methods on smaller volumes of material. The paper is devoted to the investigated possibility of processing flotation tailings of gold-silver ore of Kirankan deposit. There were studied methods of processes intensification for flotation enrichment of gold-containing flotation tailings by means of treatment of the material by ultrasound impact, preliminary electrochemical treatment of solutions for pulp preparation, and their joint use. Application of catholyte and anolyte considerably increases the rates of extraction of gold and silver in the concentrates – by 14.2 and 10.5 % respectively. The combination of ultrasonic and electrochemical influences on the flotation pulp significantly increases the efficiency of processing. According to the results of chemical analysis, ultrasonic treatment increases the extraction of gold by 25.3% and silver by 16.8% as compared with the standard flotation. Application of ultrasonic influences on the pulp allows dispersing dissolved hydrogen to the level of micro-bubbles with high specific energy of water films surrounding them. The obtained results substantiate and experimentally confirm the feasibility of using combined pneumatic and electric flotation in combination with ultrasonic treatment of pulp during the processing of flotation tailings of gold-quartz ore.

*Key words:* tailings processing, processing of technogenic deposits, gold extraction, ultrasonic treatment, electrochemical treatment, electroflotation, catholyte, combined flotation.

### Введение

В настоящее время растет значимость техногенного минерального сырья как источника благородных и цветных металлов, так как повсеместно сокращаются запасы и ресурсы руд различных типов. Актуальность переработки отвалов и хвостохранилищ также обусловлена постоянным увеличением объемов техногенных продуктов, которое несоизмеримо с их использованием. Однако целесообразность вторичного промышленного использования минерального сырья, в первую очередь, определяется возможностью доизвлечения содержащихся в нем таких сложноизвлекаемых форм золота, как пластинчатое, чешуйчатое, изометричные частицы размерностью менее 10 мкм и, главное, инкапсулированное и химически связанное дисперсное [1].

Наиболее эффективным способом извлечь благородные металлы в тонкой или дисперсной форме из упорных руд, а также из техногенных минеральных образований являются геотехнологические процессы выщелачивания [2 – 4]. Однако первостепенное значение приобретают интенсификация действующих и создание новых высокоэффективных, экологически безопасных технологий, которые позволят наиболее полно и комплексно перерабатывать труднообогатимое сырье. В последние годы в России и за рубежом проводятся исследования по разработке нетрадиционных методов переработки минерального сырья и повышения контрастности технологических свойств минералов на основе использования энергетических воздействий [5].

Один из возможных путей улучшения качества минерального сырья и технологических параметров переработки – применение предконцентрации техногенного геоматериала. Использование различных методов предконцентрации позволяет вывести из процесса переработки часть пустой породы, вредные примеси, за счет чего повышается качество исходного сырья как по содержанию ценных металлов, так и по вещественному составу руды [6]. Окончательное извлечение ценных компонентов из обогащенных зон хвостохранилищ может осуществляться методами выщелачивания на меньших объемах материала.

Ранее проведенными исследованиями [7, 8] были выявлены наиболее эффективные параметры переработки флотационных хвостов золотосодержащих руд комбинированными электрофлотационными методами. Таким образом, процесс электрофлотации является эффективной альтернативой для концентрации (извлечения) мелких частиц минералов или тонкого золота с применением пузырьков водорода и кислорода размером менее 100 мкм [9].

Усиление эффекта электрохимической обработки возможно за счет применения энергетических воздействий, например, ультразвуковой обработки рабочих растворов или перерабатываемых пульп. Ультразвук – это форма энергии, которая может локально изменять свойства и состояние среды передачи и производить множество эффектов, таких как тепловой эффект, механический эффект, химический эффект, эффект акустической кавитации и эффект акустического потока. Усиливающим эффектом ультразвука, например, в гидрометаллургии является "механический" эффект, особенно при образовании полости в жидкости. Когда в жидкости образуется полость, гидравлическая струя с турбулентными характеристиками снижает внешнее диффузионное сопротивление, разрушает твердое тело и устраняет поверхностную пленку [10, 11]. Обработка ультразвуком тонкоизмельченного материала перед флотацией может обеспечить эффект по нескольким направлениям. Помимо диспергирования минеральных частиц с соответствующим снижением степени неселективной сегрегации шламообразных минералов, возможно также разрушение коллоидов и ассоциатов реагентов, негативно влияющих на селективность их адсорбции. Кроме того, в результате ультразвуковой обработки флотационной пульпы могут изменяться физические и физико-химические свойства жидкой фазы пульпы, поверхности воздушных пузырьков, гидратных слоев в объеме водно-минеральной суспензии и на поверхности частиц [12].

Цель работы заключается в разработке эффективной технологии переработки техногенного минерального сырья методом электрофлотации. Интенсифицировать процесс переработки предлагается посредством применения комбинации электрохимической и ультразвуковой обработки пульпы.

Впервые экспериментально установлено, что повышение извлечения благородных металлов из техногенных минеральных образований, включающих сложноизвлекаемые формы золота и серебра, достигается за счет сочетания электрохимических и энергетических (ультразвуковых) воздействий.

#### Материалы и методы исследования

Исследования влияния ультразвуковой обработки на результаты флотации были проведены на флотационных хвостах месторождения Киранкан. Остаточные содержания благородных металлов в пробе: Au – 1,15 г/т, Ag – 1,43 г/т. Перед каждым экспериментом навеска исследуемого материала предварительно доизмельчается в лабораторной планетарной мельнице (Pulverisette 5, Fritsch) до крупности 92 % класса 74 мкм. Приготовление пульпы для последующего проведения флотации осуществлялось на основе католита и биэлектролита – смеси католита и анолита. Католит и анолит являются щелочным продуктом электролиза раствора гидрокарбоната натрия с концентрацией 0,05М. Для нулевого опыта флотации использовали раствор гидрокарбоната натрия с концентрацией 0,05 М и рН 8,2. Измерение рН и Eh растворов проводилось с использованием иономера Анион 4100 со стандартным платиновым электродом. Католит и анолит получали в мембранном электролизере с катодом из нержавеющей стали и титановым анодом, имеющим оксидно-рутениевое покрытие, при объемной плотности тока  $I = 0,04 \text{ А/дм}^2$  и времени обработки 20 мин.

Исследование по флотации образцов золотосодержащего материала проводили на навесках массой 125 г в камере флотационной машины ФМЛ-1, объем камеры 500 мл. В качестве собирателя был использован бутиловый ксантогенат натрия 25 г/т, в качестве депрессора – жидкое стекло 100 г/т, вспениватель – сосновое масло 40 г/т. По схеме концентрат не подвергался перечистным операциям, время флотации составило 8 мин.

Перед флотацией растворы и пульпа обрабатывались ультразвуком с помощью ультразвуковой установки УЗДН-2Т. Рабочая частота ультразвука – 22 кГц.

Продукты флотации были исследованы на содержания Au, Ag. Спектральный, химический и гранулометрический анализы выполнены на базе ЦКП «ЦИМС» ХФИЦ ДВО РАН [13].

#### Результаты исследований

Перед проведением технологических исследований на эффективность переработки техногенного материала с использованием интенсифицирующих воздействий хвосты были исследованы на формы нахождения золота и серебра методом фазового анализа (табл. 1).

Таблица 1

#### Результаты фазового анализа на содержание форм золота Au и серебра Ag в хвостах флотации золотокварцевой руды месторождения Киранкан

Компонент	C1,[ПВ1], г/т Амальгамация	C2[ПВ2]-C3, г/т 1-ый этап цианирования	C4[ПВ3], г/т Обработка проб соляной кислотой	C5[ПВ4], г/т 2-ой этап цианирования	C5-C9[ПВ5], г/т Обработка проб царской водкой
Au	0,023	0,870	0,0103	0,0293	0,0316
Ag	0,104	1,0062	Не обнар.	0,0408	Не обнар.

Результаты фазового анализа предоставляются по нижеуказанной форме (табл. 2).

Таблица 2

### Форма предоставления результатов фазового анализа

№ п/п	Форма нахождения благородных металлов и характер связи их с рудными компонентами	Расчет количества минеральных форм Au и Ag, (г/т)
1	Au и Ag в виде свободных металлических зерен	C1
2	Au и Ag в виде сростков с рудными компонентами: хлориды, сульфаты и простые сульфиды серебра	C2-C3
3	Au и Ag, ассоциированные с минералами и химическими соединениями сурьмы и мышьяка (кроме арсенопирита и соединений пятивалентной сурьмы); сульфиды серебра (пираргирит, прустит и др.)	C3-C4
4	Au и Ag, ассоциированные с кислоторастворимыми минералами (карбонатами, окислами и гидроокислами железа и марганца) и с покрытиями (пленками)	C4-C5
5	Au и Ag, тонковкрапленные в сульфидах: пирите, арсенопирите	C6+C7+C8 или C5-C9
6	Au и Ag, тонковкрапленные в кварце, алюмосиликатах и в других кислотонерастворимых минералах	C9

По полученным результатам видно, что большая часть благородных металлов (70 – 76 %) в исходных хвостах содержится в виде сростков с рудными компонентами, что является показателем для тонкого измельчения материала перед его переработкой. Кроме того, к объектам с такими сложноизвлекаемыми формами нахождения благородных металлов могут быть успешно применены электрохимические и энергетические воздействия для их извлечения.

Для сравнения в табл. 3 представлены результаты извлечения благородных металлов из хвостов в процессе стандартной флотации.

Таблица 3

### Показатели извлечения ценных компонентов при переработке материала методом классической пенной флотации

Продукты флотации	Извлечение, %	
	Au	Ag
Концентрат	44,58	32,44
Хвосты	55,42	67,56

Полученные результаты свидетельствуют о недостаточной эффективности процесса вследствие наличия в материале сложноизвлекаемых форм нахождения благородных металлов.

Результаты комбинированной пневмо-электрофлотации представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

### Показатели извлечения ценных компонентов в процессе пневмо- электрофлотации на растворе католита

Продукты флотации	Извлечение, %	
	Au	Ag
Концентрат	58,78	42,89
Хвосты	41,22	57,11

Таблица 5

**Показатели извлечения ценных компонентов в процессе пневмо- электрофлотации на растворе католита с добавлением анолита**

Продукты флотации	Извлечение, %	
	Au	Ag
Концентрат	69,85	48,22
Хвосты	30,15	51,78

При создании восстановительной среды пульпы раствором католита наблюдается значительное повышение показателей извлечения золота и серебра (на 14,2 и 10,5 %, соответственно), что происходит за счет предотвращения окислительных процессов на поверхности минералов и влияния на их гидрофобность. Добавление порции анолита в католит в процессе приготовления пульпы приводит к дополнительному увеличению флотационного извлечения ценных компонентов: золота – на 3,2 – 25,3 %, серебра – на 6,7 – 16,8 %.

Применение ультразвука к растворам перед процессами пневмо- электрофлотации способствует диспергированию растворенного водорода до уровня микропузырьков, что может оказать влияние на извлечение тонких классов минералов-носителей ценных компонентов или на благородные металлы, находящиеся в свободном дисперсном состоянии.

Показатели извлечения благородных металлов при использовании ультразвуковой обработки растворов католита и анолита приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

**Показатели извлечения ценных компонентов при переработке флотационных хвостов с применением УЗ обработки католита**

Продукты флотации	Извлечение, %	
	Au	Ag
Концентрат	58,48	46,53
Хвосты	41,52	53,47

Таблица 7

**Показатели извлечения ценных компонентов при переработке флотационных хвостов с применением УЗ обработки анолита**

Продукты флотации	Извлечение, %	
	Au	Ag
Концентрат	51,68	52,33
Хвосты	48,32	47,67

Использование ультразвука при приготовлении растворов электролита – католита и анолита – повышает извлечение серебра на 3,64 и 4,11 %, соответственно, но существенно не влияет на показатели извлечения золота. Фазовым анализом установлено, что в отличие от золота почти 10 % серебра в пробе содержится в виде свободных зерен, поэтому такой незначительный прирост серебра в концентраты связан с изменением химического состава католита и анолита, влияющего в большей степени на минеральные

поверхности флотируемых частиц минералов, а также и на реагенты-собиратели серебра (окисление ксантогената, повышение сорбции собирателя).

Из результатов фазового анализа видно, что минералы с тонкой вкрапленностью теряются с хвостами при переработке их в стандартных пневматических флотационных машинах. Следовательно, имеет смысл подвергать энергетическим воздействиям непосредственно твердую составляющую процесса флотации, т.е. подготовленную пульпу.

Результаты извлечения ценных компонентов с применением ультразвуковой обработки пульпы, приготовленной на растворе католита, представлены в табл. 8.

Таблица 8

**Показатели извлечения ценных компонентов при переработке флотационных хвостов с применением ультразвуковой обработки флотационной пульпы**

Продукты флотации	Извлечение, %	
	Au	Ag
Концентрат	75,16	50,44
Хвосты	24,84	49,56

Полученные результаты свидетельствуют о сильном влиянии на различные процессы, связанные с кавитацией – образованием в жидкости при прохождении акустической волны полостей (кавитационных пузырьков).

Значительный прирост извлечения благородных металлов (на 16,4 % по сравнению с обработкой раствора) происходит при ультразвуковой обработке флотационной пульпы, приготовленной на растворе католита. Таким образом, ультразвук оказывает большее воздействие непосредственно на минеральные частицы, чем на растворы – в процессе обработки пульпы происходит разрушение «склеенных» в результате адгезии частиц, очищение поверхности минералов, разрушение сростков благородных металлов с рудными компонентами. К тому же под действием ультразвуковой кавитации происходит диспергирование жидкой среды пульпы, что оказывает большое влияние на скорость и эффективность процесса. Увеличивается как вероятность закрепления и удержания частиц на пузырьках, так и вероятность их совместного всплытия, поэтому процесс флотации становится значительно более эффективным.

#### *Заключение*

Ультразвуковая обработка электролизных растворов, используемых для флотации, дает незначительный прирост извлечения серебра в концентраты за счет эффективного управления состава газовой пульпы. Применение ультразвуковой обработки позволяет диспергировать растворенный водород до уровня микропузырьков с высокой удельной энергией окружающих их пленок воды. Сгенерированные микропузырьки газа в процессе электрохимической обработки и под воздействием ультразвука взаимодействуют с тонкими шламами и в дальнейшем вместе с крупными пузырьками поднимаются в пенный продукт.

Интенсификация процесса переработки комбинацией электрохимических и ультразвуковых воздействий на флотационную пульпу позволяет значительно повысить показатели извлечения благородных металлов: золота на 16,4 %, серебра на 18 %. При обработке пульпы ультразвуком технологические показатели растут, достигая оптимальных значений для дальнейшей переработки полученных концентратов методами выщелачивания.

## Список литературы

1. Секисов А.Г., Рубцов Ю.И., Лавров А.Ю. и др., 2019. Использование фотохимических и электрохимических процессов при выщелачивании золота из техногенно-трансформированного минерального сырья. *Вестник Забайкальского государственного университета*, Т. 25, № 7, С. 70 – 83.
2. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Конарева Т.Г., 2022. Кюветно-скважинное активационное выщелачивание сложноизвлекаемых форм золота при переработке кеков цианирования. *Вестник Забайкальского горного колледжа*, № 15, С. 6 – 10.
3. Брюховецкий О.С., Секисов А.Г., Рассказова А.В., Лавров А.Ю., 2021. Повышение извлечения химически связанного золота при активационном кучном выщелачивании из упорных руд. *Горный журнал*, № 12, С. 32 – 36.
4. Migachev I.F., Sedelnikova G.V., Krylova G.S., 1999. Peculiarities of heap leaching of gold Mn-Hg and As-bearing ores. *Int. Mining and Environment Congress*, July, Lima, Peru. P. 139 – 144.
5. Чантурия В.А., 2009. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S15, С. 9 – 25.
6. Телков Ш.А., Мотовилов И.Ю., Барменшинова М.Б., Абишева З.С., 2021. Исследование кинетики минерализации пузырька воздуха в суспензии активированного и неактивированного сфалерита. *Обогащение руд*. № 6, С. 9 – 15.
7. Прохоров К.В., Копылова А.Е., 2020. Перспективные способы интенсификации процесса флотации медно-порфириновых и золото-серебряных руд путем применения электрохимической обработки. *Проблемы недропользования*, № 2(25), С. 96 – 106. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.096
8. Копылова А.Е., Прохоров К.В., Богомяков Р.В., 2020. Интенсификация извлечения золота при электрохимической обработке пульпы флотации медно-порфириновых и золотокварцевых руд. *Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения - 2020): Материалы международной конференции, Апатиты, 21–26 сентября 2020 года*. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, С. 137 – 139.
9. Ronald Rojas Nacha, Maurício Leonardo Torem, Antonio Gutiérrez Merma, Vanessa Figueiredo da Silva Coelho, 2018. Electroflotation of fine hematite particles with *Rhodococcus opacus* as a biocollector in a modified Partridge–Smith cel. *Minerals Engineering*, V. 126, pp. 105 – 115.
10. Yuting Hu, Ping Guo, Shixing Wang, Libo Zhang, 2020. Leaching Kinetics of Antimony from Refractory Gold Ore in Alkaline Sodium Sulfide under Ultrasound. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 164, P. 219 – 229.
11. Чернышев А.В., Черепанова М.В., 2020. Перспективы применения ультразвука на стадии пенной флотации (флотационное обесшламливание) в процессе переработки сильвинита. *Химия. Экология. Урбанистика*, Т. 4, С. 209 – 213.
12. Киенко Л.А., Воронова О.В., 2014. Флотация флюоритовых руд с предварительной обработкой пульпы ультразвуком. *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XIV Международная научно-практическая конференция: в 3-частях, Чита, 26–28 ноября 2014 года*. Забайкальский государственный университет, Часть 1. Чита: Забайкальский государственный университет, С. 144 – 149.
13. Прохоров К.В., Гладырь А.В., Рассказов М.И., 2020. Центр коллективного пользования "Центр исследования минерального сырья". *Горная промышленность*, № 4, С. 120 – 124.

## References

1. Sekisov A.G., Rubtsov Yu.I., Lavrov A.Yu. i dr., 2019. Ispol'zovanie foto-khimicheskikh i elektrokhimicheskikh protsessov pri vyshchelachivanii zolota iz tekhnogen-no-transformirovannogo mineral'nogo syr'ya [Photochemical and electrochemical processes used in the leaching of gold from technogenically transformed mineral raw materials]. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudar-stvennogo universiteta*, T. 25, № 7, P. 70 – 83.
2. Sekisov A.G., Zykov N.V., Konareva T.G., 2022. Kyuvetno-skvazhinnoe aktivatsionnoe vyshchelachivanie slozhnoizvlekaemykh form zolota pri pererabotke kekov tsya-nirovaniya [Cuvette-borehole activation leaching of hard-to-recover forms of gold during the processing of cyanidation cakes]. *Vestnik Zabaikal'skogo gornogo kolledzha*, № 15, P. 6 – 10.
3. Bryukhovetskii O.S., Sekisov A.G., Rasskazova A.V., Lavrov A.Yu., 2021. Povyshenie izvlecheniya khimicheskii svyazannogo zolota pri aktivatsionnom kuchnom vyshchelachivanii iz upornykh rud [Increased extraction of chemically bound gold during activated heap leaching from resistant ores]. *Gornyi zhurnal*, № 12, P. 32 – 36.
4. Migachev I.F., Sedelnikova G.V., Krylova G.S., 1999. Peculiarities of heap leaching of gold Mn-Hg and As-bearing ores. *Int. Mining and Environment Congress*, July, Lima, Peru. P. 139 – 144.
5. Chanturiya V.A., 2009. Innovatsionnye protsessy v tekhnologiyakh pererabotki mineral'nogo syr'ya slozhnogo veshchestvennogo sostava [Innovative processes in the technologies of processing mineral raw materials of complex material composition]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S15, P. 9 – 25.
6. Telkov Sh.A., Motovilov I.Yu., Barmenshinova M.B., Abisheva Z.S., 2021. Issledovanie kinetiki mineralizatsii puzyr'ka vozdukh v suspensii aktivirovannogo i neaktivirovannogo sfalerita [Investigation of the kinetics of mineralization of an air bubble in the suspension of activated and non-activated sphalerite]. *Obogashchenie rud*. № 6, P. 9 – 15.
7. Prokhorov K.V., Kopylova A.E., 2020. Perspektivnye sposoby intensivifikatsii protsessa flotatsii medno-porfirovykh i zoloto-serebryanykh rud putem primeneniya elektrokhimicheskoi obrabotki. [Promising methods for the intensification of the flotation process of copper-porphyry and gold-silver ores with the use of electrochemical processing]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2(25), P. 96 – 106. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.096
8. Kopylova A.E., Prokhorov K.V., Bogomyakov R.V., 2020. Intensifikatsiya izvlecheniya zolota pri elektrokhimicheskoi obrabotke pul'py flotatsii medno-porfirovykh i zolotokvartsevykh rud [Intensification of gold extraction during electrochemical treatment of pulp flotation of copper-porphyry and gold-quartz ores]. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogen'nogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya - 2020): Materialy mezhdunarodnoi konferentsii, Apatity, 21–26 sentyabrya 2020 goda. Apatity: Kol'skii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk*, P. 137 – 139.
9. Ronald Rojas Hacha, Mauricio Leonardo Torem, Antonio Gutiérrez Merma, Vanessa Figueiredo da Silva Coelho, 2018. Electroflotation of fine hematite particles with *Rhodococcus opacus* as a biocollector in a modified Partridge–Smith cel. *Minerals Engineering*, V. 126, pp. 105 – 115.
10. Yuting Hu, Ping Guo, Shixing Wang, Libo Zhang, 2020. Leaching Kinetics of Antimony from Refractory Gold Ore in Alkaline Sodium Sulfide under Ultrasound. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 164, P. 219 – 229.
11. Chernyshev A.V., Cherepanova M.V., 2020. Perspektivy primeneniya ul'trazvuka na stadii pennoi flotatsii (flotatsionnoe obesshlamlivanie) v protsesse pererabotki sil'vinita [Prospects for the use of ultrasound at the stage of foam flotation (flotation desludging) in the process of processing sylvinitite]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*, V. 4, P. 209 – 213.
12. Kienko L.A., Voronova O.V., 2014. Flotatsiya flyuoritovykh rud s predvaritel'noi obrabotkoi pul'py ul'trazvukom [Flotation of fluorite ores with pretreatment of pulp by ultrasound]. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov:*



XIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: v 3-chastyakh, Chita, 26 - 28 noyabrya 2014 goda. Zabaikal'skii gosudarstvennyi universitet, Chast' 1. Chita: Zabaikal'skii gosudarstvennyi universitet, P. 144 – 149.

13. Prokhorov K.V., Gladyr' A.V., Rasskazov M.I., 2020. Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya "Tsentr issledovaniya mineral'nogo syr'ya" [Research Equipment Sharing Center "Center of research of mineral raw materials"]. Gornaya promyshlennost', № 4, P. 120 – 124.