

# Подавление флотации слоистых силикатов при переработке золото-медно-магнетитовых руд<sup>1</sup>

УДК 622.765.061.25

А. С. Сидорович, научный сотрудник<sup>1</sup>, эл. почта: sidorovich.as@mekhanobr.comА. В. Коваль, научный сотрудник<sup>1</sup>, эл. почта: koval.av@mekhanobr.com<sup>1</sup>АО «Механобр инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия.

*Изучено влияние органических депрессоров на основе анионных полимеров различного химического состава со средними молекулярными массами в диапазоне от 3250 до 27 500 а. е. м. на флотацию слоистых силикатов в составе золото-медно-магнетитовых руд в открытом цикле. Показана тенденция к снижению и последующей стабилизации выхода пенного продукта флотации с увеличением молекулярной массы анионных полимеров различного химического состава при их постоянном расходе, отмечено побочное влияние применения этих депрессоров на извлечение меди. При этом очевидного эффекта от различий в химическом составе рассматриваемых полимеров на обнаруженные закономерности не обнаружено. В ходе исследования действия анионных полимеров одинакового химического состава со средними молекулярными массами 7000 и 27 500 а. е. м. в диапазоне расходов от 50 до 1000 г/т были обнаружены схожие тенденции к снижению и последующей стабилизации извлечения в пенный продукт меди и оксида магния, выбранного в качестве маркера слоистых силикатов. Показано, что с ростом молекулярной массы полимера увеличиваются потери меди и усиливается депрессирующий эффект, оказываемый на магниевые силикаты, при сохранении общего вида зависимости.*

**Ключевые слова:** сульфидная флотация, анионные полимеры, слоистые силикаты, депрессия слоистых силикатов.

**DOI:** 10.17580/tsm.2026.01.01

## Введение

При обогащении различных типов руд часто сталкиваются с проблемой нежелательной флотации слоистых силикатов, что приводит к снижению качества получаемых концентратов. На практике в качестве депрессоров талька и других слоистых силикатов наиболее часто применяют природные полисахариды – гуаровую камедь [1], карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) и карбоксиметилкрахмал (КМК), как в чистом виде [1–4], так и в смеси с другими соединениями [5–7]. В связи с этим необходимо подчеркнуть первенство института «Механобр» в разработке и внедрении КМЦ в качестве депрессора силикатов на обогатительных фабриках Кольского полуострова и Красноярского края, а также в лабораторных и полупромышленных условиях на валовых пробах сульфидных медно-никелевых руд других месторождений [8, 9]. Реже в качестве модификаторов, снижающих флотацию слоистых силикатов, применяют сополимеры и смеси органических кислот [10–17]. В работе [18] рассмотрено влияние молекулярной массы карбоксиметилированных крахмалов на их депрессирующее действие, однако для реагентов на основе производных органических кислот аналогичные зависимости изучены недостаточно. В представленной

работе изучена взаимосвязь молекулярной массы подобных соединений и их способности подавлять флотацию слоистых силикатов в составе изучаемой руды.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлась золото-медно-магнетитовая руда. Ее вещественный состав был определен с помощью количественного оптического анализа, рентгенофазового (РФА), рентгеноспектрально-микроанализа (РСМА), а также согласованных химического и фазового анализов. Основная доля пробы представлена магнетитом (27,6 %), пироксенами (18,9 %) и карбонатами (9,2 %) – характерными минералами для скарнов. Помимо магнетита в группу рудных минералов входят халькопирит (1,5 %) и пирит (2,4 %). На минералы группы слоистых алюмосиликатов (глинисто-слюдистые минералы, хлорит, тальк, серпентин) приходится 24,2 % общей массы. Также отмечается наличие в пробе амфиболов, полевых шпатов, кварца, граната и эпидота.

Для оценки влияния молекулярной массы на депрессирующее свойство реагентов были использованы образцы депрессоров, характеристики которых представлены в **таблице**. Состав и среднее значение молекулярной массы приняты по данным паспортов реагентов. Рассматриваемые реагенты, за исключением образцов 1 и 2, 3 и 6, имеют различный химический состав, но входят в одну группу анионных полимеров, поскольку в их составе имеются анионные ионизирующие группы, в том числе карбоксильная.

<sup>1</sup> Эта статья основана на дополненных материалах одноименного доклада, представленного на конференции «Плаксинские чтения – 2025» в Екатеринбурге, 29 сентября – 4 октября 2025 г. Тезисы доклада опубликованы в сборнике «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья», ISBN: 978-5-6047797-5-0.

Характеристика образцов депрессоров				
Номер образца	Состав	Средняя молекулярная масса, а. е. м.	Функциональная группа в ионизированной форме	
			формула	наименование
1	Полиакрилат натрия	3250	-COO <sup>-</sup>	Карбоксильная
2	Полиакрилат натрия	6000	-COO <sup>-</sup>	Карбоксильная
3	Сополимер акриловой и малеиновой кислот и их солей	7000	-COO <sup>-</sup>	Карбоксильная
4	Сополимер акриловой, метакриловой и малеиновой кислот	13 750	-COO <sup>-</sup>	Карбоксильная
5	Смесь акриловой и винилсульфоновой кислот и их солей	17 500	-SO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; -COO <sup>-</sup>	Сульфонатная; карбоксильная
6	Сополимер акриловой и малеиновой кислот и их солей	27 500	-COO <sup>-</sup>	Карбоксильная

Для выявления действия испытуемых депрессоров на показатели основной флотации анализировали содержание меди и оксида магния в продуктах обогащения. Содержание элементов/соединений определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП, ICP-AES) в соответствии с СТО АЦ 3.001-2016<sup>2</sup>.

### Методика проведения исследований

Действие депрессоров рассматривали на стадии основной флотации при питании крупностью 70 % класса -0,071 мм. Масса навески руды составляла 650 г. Для проведения экспериментов использовали лабораторную механическую флотомашину ФМЛ-3 (240 ФЛ) производства НПК «Механобр-техника» с камерой объемом 1,5 л, содержание твердого в камере составляло 33 %. Значение рН в процессе флотации поддерживали на уровне 9,5–9,7 и достигали подачей СаО в форме 5%-ной водной суспензии. Технологический режим включал контактирование 1%-ного раствора депрессора (концентрация раствора в массовых долях, 150 г/т, 5 мин) и дробную подачу смеси собирателей МТФ-421

в чистом виде и бутилового ксантогената калия (БКК) в форме 2%-ного раствора с суммарным расходом 39 г/т. Растворы депрессоров и БКК готовили перемешиванием в мешалке с магнитным якорем при комнатной температуре; при расчете концентраций растворов учитывали содержание активного вещества в реагенте. Общее время флотации в опыте составляло 26 мин. Действие депрессоров оценивали в сравнении с результатами базового опыта без подачи депрессора.

### Результаты исследований и их обсуждение

В опытах при постоянном расходе депрессора 150 г/т наблюдали общую тенденцию к снижению выхода пенного продукта с ростом молекулярной массы реагента и его стабилизацию с некоторого значения молекулярной массы реагента (**рис. 1**).

Для количественной характеристики действия рассматриваемых депрессоров на слоистые силикаты в качестве маркера был выбран оксид магния MgO, который преимущественно приурочен к флотоактивным тальку и серпентину с содержанием магния в оксидной форме 29,12 и 40,54 % соответственно. Диаграмма обогатимости (**рис. 2**) отражает тенденцию изменения извлечения меди и оксида магния в продукты флотации в зависимости от молекулярной массы депрессора.

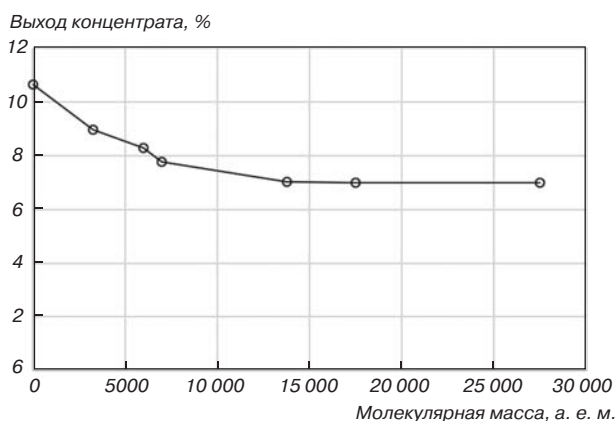


Рис. 1. Выход концентрата в присутствии депрессоров различной молекулярной массы

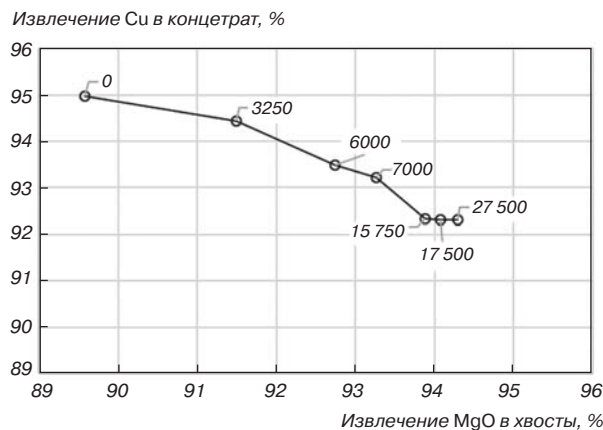


Рис. 2. Диаграмма обогатимости (расход депрессоров 150 г/т) в зависимости от молекулярной массы депрессора

<sup>2</sup>СТО АЦ 3.001–2016. Методика (метод) измерений. Породы горные, руды, продукты их переработки. Определение массовых долей элементов атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой. – ФГУП «ВИМС», 3 квартал 2025.

Превышение молекулярной массы анионного полимера (13 750 а. е. м. в рассматриваемых условиях) приводит к незначительному увеличению извлечения магневых минералов в хвосты флотации при сохранении извлечения меди в концентрат более 92 %. Принимая во внимание стабилизацию выхода концентрата в том же диапазоне значений молекулярной массы депрессора, следует говорить также и о стабилизации качества концентрата по меди. В таком случае наблюдаемый прирост извлечения MgO в хвосты флотации с увеличением молекулярной массы депрессора, вероятнее всего, нужно рассматривать как колебания значений вокруг некоторого среднего, а не как достоверный эффект.

Следует отметить, что, сравнивая действие образцов реагентов на флотацию, нельзя исключать из рассмотрения различия их химического состава. В особенности это касается образца 5, в составе которого помимо карбоксильной присутствует также сульфонатная группа, значительно повышающая гидрофильность молекулы, благодаря большей степени диссоциации по сравнению с карбоксильными соединениями. В то же время чувствительность сульфонатов к щелочной среде, в которой проходит процесс основной флотации, может привести к дестабилизации виниловой связи, вызывая разрушение молекулярной структуры мономера.

Чтобы объективно оценить влияние молекулярной массы на подавление флотации слоистых силикатов, были отобраны образцы 3 и 6 сходного химического состава, различающиеся только молекулярной массой входящих в них сополимеров. Действие образцов с молекулярными массами 7000 и 27 500 а. е. м. было протестировано при расходах 50, 150, 500 и 1000 г/т (рис. 3).

Введение депрессора оказывает влияние на извлечение меди и приводит к его снижению уже при расходе 50 г/т, при этом потери меди выше при подаче высокомолекулярного депрессора. Подавление магневых силикатов несколько усиливается при повышении расхода депрессора с молекулярной массой 7000 а. е. м., однако с повышением молекулярной массы этот эффект не прослеживается явно, и извлечение MgO в концентрат стабилизируется. Это свидетельствует о снижении эффективности депрессирующего действия высокомолекулярного депрессора при повышении его концентрации в жидкой фазе флотационной пульпы, которое может быть объяснено возникающими стерическими эффектами, затрудняющими реакцию способностью крупных молекул, особенно в реакциях, требующих доступа к функциональным группам, а также электростатическими силами отталкивания, возникающими вследствие возрастания числа ионизирующихся групп, увеличения отрицательного заряда полианиона и снижения сорбции полимера на поверхности минеральной частицы.

Характер зависимости извлечения меди от ее содержания в концентрате не изменяется с ростом молекулярной массы депрессора (рис. 4): обе кривые демонстрируют одинаковую динамику. Локальные убывания содержания и извлечения совпадают по величине в обеих сериях опытов; существенное их различие – общие потери меди: с увеличением молекулярной массы депрессора при сохранении его расхода извлечение меди ниже.

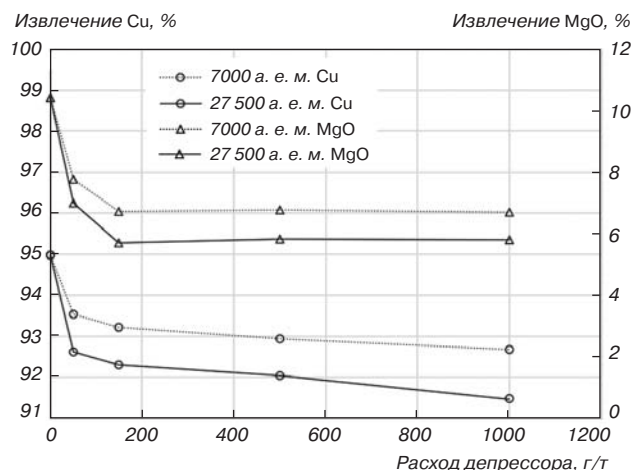


Рис. 3. Извлечение компонентов в концентрат при изменении расхода депрессоров различной молекулярной массы

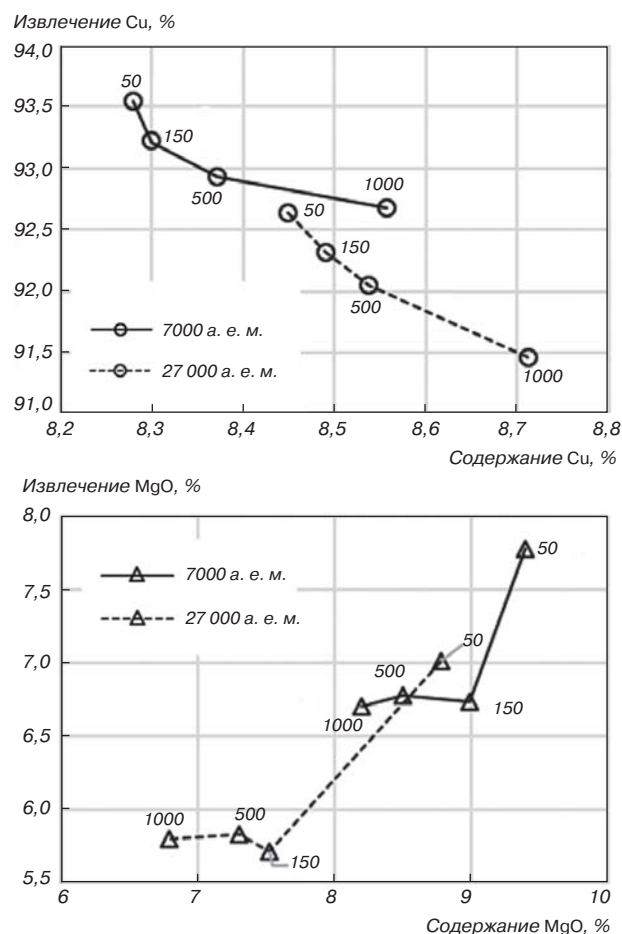


Рис. 4. Зависимость извлечения компонентов от их содержания в концентрате при изменении расхода депрессоров с разной молекулярной массой (расход в г/т)

Для MgO зависимость имеет обратную форму и иллюстрирует общее снижение показателей при увеличении расхода депрессора. График отражает выведенное выше предположение о снижении эффективности подавляющего действия депрессора с ростом его концентрации в пульпе: видно, что кривые стремятся к плато при достижении расхода депрессора 150 г/т, при этом с увеличением молекулярной массы депрессора общие потери MgO возрастают.

### Заключение

В ряду депрессоров на основе органических кислот и их солей с преимущественно карбоксильными функциональными группами при флотации золото-медно-магнетитовых руд с увеличением молекулярной массы реагента наблюдается тенденция к снижению

выхода флотационного концентрата с его стабилизацией при достижении средней молекулярной массы 13 750 а. е. м. Опыты с применением депрессоров одного химического состава, но различной молекулярной массы показали, что высокомолекулярные депрессоры в большей степени ухудшают показатели медной флотации, при этом эффективность их подавляющего действия на слоистые силикаты с высоким содержанием оксида магния снижается с ростом концентрации реагента: молекулярная масса полимера в этом случае оказывает влияние только на общие потери MgO. Снижение содержания оксида магния в пенном продукте на ранних стадиях медной флотации позволит получить конечный концентрат, пригодный для последующей металлургической переработки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Красавцева Е. А., Горячев А. А.** Обзор способов депрессии талька при флотации медно-никелевых руд // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10, № 6. С. 149–154.
2. **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.
3. **Лавриненко А. А., Кузнецова И. Н., Лусинян О. Г., Гольберг Г. Ю.** Применение отечественных полимерных анионоактивных депрессоров при флотации забалансовой оталькованной медно-никелевой руды // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. № 5. С. 5–14.
4. **Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю., Шрадер Э. А., Саркисова Л. М., Кузнецова И. Н.** Поверхностные взаимодействия частиц талька с пузырьками воздуха в присутствии депрессора карбоксиметилцеллюлозы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11. С. 68–79.
5. **Лавриненко А. А., Кузнецова И. Н., Саркисова Л. М., Шрадер Э. А., Копыльцов А. А.** Применение модифицированных крахмалов в качестве депрессора силикатов при флотации малосульфидной платинометаллической руды // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : сб. трудов конф. 2021. С. 119–122.
6. **Афанасова А. В., Абурова В. А., Прохорова Е. О., Лушина Е. А.** Исследование влияния депрессоров на флотоактивные породообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6–2. С. 161–174.
7. **Арабаджи Я. Н., Орехова Н. Н., Абдрахманов К. И., Абдрахманов Э. И.** Аспектный анализ механизмов загрязнения сульфидных концентратов шламами из вмещающих пород и обзор методов его снижения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 4. С. 55–70.
8. **А. с. №110039.** Способ флотационного обогащения медно-никелевых руд / Н. В. Зашихин, И. И. Ванеев, С. И. Горловский ; 1957.
9. **Ванеев И. И.** К вопросу о механизме депрессирующего действия карбоксиметилцеллюлозы на флотоактивные силикаты при флотации медно-никелевых руд // Некоторые вопросы теории и технологии обогащения руд. 1962. № 131. С. 75–88.
10. **Немчинова Л. А., Шарафутдинова А. Н.** Получение свинцового концентрата пенным продуктом из бедных по свинцу полиметаллических руд // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : сб. трудов конф. 2018. С. 126–130.
11. **Пат. 2140329 С1 РФ, МПК В03D 1/016, В03D 101/06.** Способ извлечения ценных сульфидных минералов из руд / С. В. Самуэль, Д. Р. Нагараж, С. Л. Джеймс, М. Лино ; заявл. 07.05.1996 ; опубл. 27.10.1999 ; заявитель Сайтек Текнолоджи Корп. – 7 с.
12. **Пат. 4902764A US.** Polymeric sulfide mineral depressants / A. S. Rothenberg, D. W. Lipp, S. S. Wang, D. P. Spitzer ; Publ. Feb. 20, 1990. – 9 p.
13. **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, Iss. 12. P. 3155–3162.
14. **Pugh R. J.** Macromolecular organic depressants in sulphide flotation—a review, 1. Principles, types and applications // International Journal of Mineral Processing. 1989. Vol. 25, Iss. 1–2. P. 101–130.
15. **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, Iss. 1–2. P. 131–146.
16. **Beattie D. A.** et al. The effect of polysaccharides and polyacrylamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals // Minerals Engineering. 2006. Vol. 19, Iss. 6–8. P. 598–608.
17. **Арсентьев В. А., Горловский С. И., Устинов И. Д.** Комплексное действие флотационных реагентов. – М. : Недра, 1992. – 160 p.
18. **Лавриненко А. А., Кузнецова И. Н., Саркисова Л. М., Шрадер Э. А., Копыльцов А. А.** Влияние молекулярного веса карбоксиметилированных крахмалов на их депрессирующее действие при флотации оталькованной платинометаллической Cu – Ni руды // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : сб. трудов конф. 2022. С. 216–219. ЦМ

*Tsvetnye Metally*. 2026. No. 1. pp. ----  
DOI: 10.17580/tsm.2026.01.01

## DEPRESSION OF LAYERED SILICATES FLOTATION DURING GOLD-COPPER-MAGNETITE ORES PROCESSING

### Information about authors

A. S. Sidorovich, Project Researcher<sup>1</sup>, e-mail: sidorovich.as@mekhanobr.com  
A. V. Koval, Project Researcher<sup>1</sup>, e-mail: koval.av@mekhanobr.com

<sup>1</sup>JSC Mekhanobr Engineering, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

The effect of organic depressants based on anionic polymers of different chemical compositions with average molecular weights in the range from 3,250 to 27,500 AMU on the flotation of phyllosilicates (sheet silicates) in gold-copper-magnetite ores in open-circuit experiments has been studied. A tendency to decrease and subsequent stabilization of the yield of the froth product with an increase in the molecular weight of anionic polymers of different chemical compositions at constant consumption rate is shown, and the side effect of the use of these depressants on copper recovery is noted. At the same time, there was no obvious effect of differences in the chemical composition of the polymers under consideration on the discovered patterns.

During the study of the action of anionic polymers of the same chemical composition with average molecular weights of 7000 and 27,500 AMU, similar tendencies were found in the across consumption rates from 50 to 1000 g/t towards a decrease and subsequent stabilization of the recovery of copper and magnesium oxide into the froth product, selected as a marker of sheet silicates. It has been shown that as the molecular weight of the polymer increases, copper losses and the depressive effect on magnesium silicates increase as well, while maintaining the general type of dependence.

**Key words:** sulfide flotation, anionic polymers, phyllosilicates, sheet silicates.

### References

- Krasavtseva E. A., Goryachev A. A. An overview of talc depression methods during flotation of copper-nickel ores. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2019. Vol. 10, No. 6. pp. 149–154.
- Kuznetsova I. N., Lavrinenko A. A., Shrader E. A., Sarkisova L. M. Reduction of extraction of floatoactive silicates into a collective concentrate during flotation of low-sulfide platinum-metal ore. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2019. No. 5. pp. 200–208.
- Lavrinenko A. A., Kuznetsova I. N., Lusinyan O. G., Golberg G. Yu. The use of domestic polymer anion-active depressors in the flotation of off-balance cast copper-nickel ore. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2023. No. 5. pp. 5–14.
- Lavrinenko A. A., Golberg G. Yu., Shrader E. A., Sarkisova L. M., Kuznetsova I. N. Surface interactions of talc particles with air bubbles in the presence of a carboxymethylcellulose depressor. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2021. No. 11. pp. 68–79.
- Lavrinenko A. A., Kuznetsova I. N., Sarkisova L. M., Shrader E. A., Kopyltsov A. A. The use of modified starches as a silicate depressor in the flotation of low-sulfide platinum-metal ore. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syrya : Proceedings of the Conference*. 2021. pp. 119–122.
- Afanasova A. V., Aburova V. A., Prokhorova E. O., Lushina E. A. Investigation of the effect of depressors on flotation-active rock-forming minerals during flotation of sulfide gold-bearing ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. No. 6-2. pp. 161–174.
- Arabadzhi Ya. N., Orekhova N. N., Abdrakhmanov K. I., Abdrakhmanov E. I. An aspect analysis of the mechanisms of contamination of sulfide concentrates by sludge from host rocks and a review of methods for its reduction. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2024. Vol. 30, No. 4. pp. 55–70.
- Zashikhin N. V., Vaneev I. I., Gorlovsky S. I. A method of flotation enrichment of copper-nickel ores. Authors' certificate No. 110039, 1957.
- Vaneev I. I. On the mechanism of the depressing effect of carboxymethylcellulose on flotation silicates during flotation of copper-nickel ores. *Nekotorye voprosy teorii i tekhnologii obogashcheniya rud*. 1962. No. 131. pp. 75–88.
- Nemchinova L. A., Sharafutdinova A. N. Production of lead concentrate by a froth product from lead-poor polymetallic ores. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syrya : Proceedings of the Conference*. 2018. pp. 126–130.
- S. V. Samuel, D. R. Nagarazh, S. L. James, M. Lino. A method for extracting valuable sulfide minerals from ores. Patent RF, No. 2140329, C1. Applied: 07.05.1996. Published: 27.10.1999.
- Alan S. Rothenberg, David W. LippSamuel, S. WangDonald, P. Spitzer. Polymeric sulfide mineral depressants. Patent USA, No. 4902764A. Published: 20.02.1990.
- 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, Iss. 12. pp. 3155–3162.
- Pugh R. J. Macromolecular organic depressants in sulphide flotation – a review, 1. Principles, types and applications. *International Journal of Mineral Processing*. 1989. Vol. 25, Iss. 1-2. pp. 101–130.
- 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, Iss. 1-2. pp. 131–146.
- Beattie D. A. et al. The effect of polysaccharides and polyacrylamides on the depression of talc and the flotation of sulphide minerals. *Minerals Engineering*. 2006. Vol. 19, Iss. 6-8. pp. 598–608.
- Arsentiev V. A., Gorlovskiy S. I., Ustinov I. D. Complex action of flotation reagents. Moscow : Nedra, 1992. 160 p.
- Lavrinenko A. A., Kuznetsova I. N., Sarkisova L. M., Schrader E. A., Kopyltsov A. A. Influence of the molecular weight of carboxymethylated starches on their depressing effect during flotation of calcined platinum-metal Cu – Ni ore. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syrya*. 2022. pp. 216–219.