

Влияние ультразвуковой обработки рудной пульпы с частотой 22 кГц на рост кинетики бактериально-химических процессов

А. А. Аврейцевич, В. А. Иодис✉

ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН),
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

✉ iodisva@mail.ru

Резюме. Проведен анализ исследований ультразвукового воздействия для интенсификации процессов обогащения минерального сырья, активации, регенерации и переработки отработанных катализаторов. Исследование показало, что ультразвуковая обработка благодаря создаваемым кавитации, радиационному давлению, акустическим потокам действительно позволяет существенно ускорить процессы обогащения под средством удаления поверхностных отложений, оксидных пленок, диспергации частиц. Проведено экспериментальное исследование процесса бактериально-химического выщелачивания сульфидных кобальт-медно-никелевых руд с использованием предварительной ультразвуковой обработки рудной пульпы и без нее для увеличения кинетики процесса, извлечения целевых металлов. Исследование показывает, что использование ультразвукового излучения ($22 \text{ кГц} \pm 1,65$, 23 Вт/см^2 , $1\ 800 \text{ с}$) способствует увеличению скорости процесса: по никелю (Ni) – в 1,83 раза, по меди (Cu) – в 2,83 раза, по кобальту (Co) – в 3,86 раза, способствует росту извлечения: по Ni – в 2,18 раза, по Cu – в 4,02 раза, по Co – в 2,96 раза. Эксперименты показали, что бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при отношении Т:Ж рудной пульпы 1:3, отношении Т:Ж пульпы бактериальной суспензии 1:5 целесообразно для получения богатых по составу полиметаллических растворов никеля, меди и кобальта. В целях интенсификации извлечения целевых металлов необходимо продолжить исследования процесса бактериально-химического выщелачивания при различных плотностях рудной пульпы, пульпы бактериальной суспензии, различной продолжительности ультразвукового воздействия, частоты излучения, его различных интенсивностях.

Ключевые слова: ультразвуковое излучение, сульфидные руды, активация рудной пульпы, оксидные пленки, биогидрометаллургическая переработка, бактериально-химическое выщелачивание, никель, медь, кобальт

Для цитирования: Аврейцевич А.А., Иодис В.А. Влияние ультразвуковой обработки рудной пульпы с частотой 22 кГц на рост кинетики бактериально-химических процессов. Маркшейдерия и недропользование. 2025;25(6):40-45. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-40-45>.

The effect of ultrasonic treatment of ore pulp at 22 kHz on the increase in the kinetics of bacterial-chemical processes

A. A. Avreitsevich, V. A. Iodis✉

Research Geotechnological Center,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (RGC FEB RAS),
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

✉ iodisva@mail.ru

Abstract. An analysis of studies of ultrasonic impact for intensification of mineral raw material enrichment processes, for activation, regeneration and recycling of spent catalysts was conducted. The study showed that ultrasonic treatment, thanks to the cavitation, radiation pressure, and acoustic flows it creates, can significantly accelerate enrichment processes by removing surface deposits, oxide films, and dispersing particles. An experimental study was conducted on the process of bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ores using preliminary ultrasonic treatment of ore pulp and without it to increase the kinetics of the process and increase the extraction of target metals. The study shows that the use of ultrasonic radiation ($22 \text{ kHz} \pm 1.65$, 23 W/cm^2 , 1800 s) helps

to increase the process speed – for nickel by 1.83 times, for copper by 2.83 times, for cobalt by 3.86 times, and helps to increase the extraction – for Ni by 2.18 times, for Cu by 4.02 times, for Co by 2.96 times. Experiments have shown that bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore with a solid:liquid ratio of ore pulp of 1:3 and a solid: liquid ratio of bacterial suspension pulp of 1:5 is suitable for obtaining rich polymetallic solutions of nickel, copper and cobalt. In order to intensify the extraction of target metals, it is necessary to continue research into the process of bacterial-chemical leaching at different densities of ore pulp, bacterial suspension pulp, different durations of ultrasonic exposure, radiation frequencies, and its different intensities.

Keywords: ultrasonic radiation, sulfide ores, activation of ore pulp, oxide films, biohydrometallurgical processing, bacterial-chemical leaching, nickel, copper, cobalt

For citation: Avreitsevich A.A., Iodis V.A. The effect of ultrasonic treatment of ore pulp at 22 kHz on the increase in the kinetics of bacterial-chemical processes. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):40-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-40-45>.

Введение

Сокращение ресурсов высококачественных руд цветных металлов, обострение в мире экологических проблем делают актуальным развитие экологически безопасных (природоподобных) биогидрометаллургических технологий в горноперерабатывающей промышленности. Биогидрометаллургические способы переработки рудного сырья получают распространение благодаря большей экологичности и относительно высокой рентабельности. Камчатский регион располагает значительным минерально-сырьевым потенциалом. Здесь в последние годы активно развиваются горнодобывающие предприятия. Однако применяемые биогидрометаллургические технологии имеют относительно низкую кинетику бактериально-химических процессов окисления руд. В настоящее время ультразвуковое излучение все чаще используется для увеличения скорости процессов в технологиях переработки минерального сырья.

Цель работы: исследование влияния предварительной ультразвуковой обработки пульпы сульфидных руд с частотой 22 кГц, интенсивностью излучения 23 Вт/см², продолжительностью 1 800 с на повышение кинетики бактериально-химических процессов, рост извлечения целевых металлов.

Анализ предыдущих исследований

В России исследования ультразвукового воздействия для интенсификации процессов обогащения минерального сырья проводили и проводят такие организации, как ВНИИХТ, МИСиС, ИПКОН РАН, ИГД ДВО РАН, ООО «Центр ультразвуковых технологий», БТИ АлтГТУ, НИГТЦ ДВО РАН [1, 2]. Исследования в данном направлении нашло применение для удаления оксидных пленок полевого шпата, стекольных кварцевых песков, Al₂O₃, SiC, В и других перед гидрометаллургическими процессами. Эксперименты проводились в диапазоне частот 15–44 кГц, с достаточно низкими интенсивностями – 2–8 Вт/см², однако исследования в разном диапазоне частот, продолжительностей и интенсивностей для одного объекта не проводились [3–6]. В мировой науке основными направлениями исследований является изучение влияния ультразвукового воздействия на разрушения минеральных агрегатов, оксидных пленок, образование дефектов кристаллических решеток руд, а также определение оптимальных параметров ультразвукового воздействия, снижение энергозатрат. Например, результаты исследований [7] показали успешное удаление оксидных пленок с поверхности Ni под действием ультразвука, что ускорило процесс получения высокочастотного NiSO₄. Увеличение скорости процесса выщелачивания сурьмы из упорной золотосодержащей руды в щелочном сульфиде натрия при ультразвуковом воздействии

было достигнуто [8]. Положительные результаты по использованию ультразвука для обогащения никелевой руды, в частности удаления серпентина с поверхности пентландита, получены [9]. Значительное увеличение извлечения золота при выщелачивании карбонизированным циануратом натрия в условиях ультразвуковой активации достигнуто в работе [10]. Имеются данные [11] об интенсификации процесса кислотного выщелачивания циркония из эвдиалитового концентрата ультразвуком за счет образования ювенильной поверхности минеральных частиц. Ультразвуковая обработка (22–44 кГц, до 13 Вт/см²) отработанных катализаторов позволяет их активировать и регенерировать под средством удаления оксидных пленок, поверхностных отложений, измельчения частиц катализаторов [12–17].

Анализ литературных данных показывает, что благодаря воздействию ультразвукового излучения на рудную пульпу происходит разрушение оксидных пленок на поверхности частиц, образование ювенильной поверхности, поверхностных дефектов, дисперсия частиц. Это позволяет значительно увеличить кинетику процессов технологий переработки минерального сырья.

Материал и методы исследования

Характеристика руды. В экспериментах использована окисленная сульфидная кобальт-медно-никелевая руда месторождения Шануч (Камчатский край, Россия). Месторождение входит в Шанучское рудное поле и расположено в средней части северного склона горы Верхняя Тхонжа (Срединный хребет Центральной Камчатки). Рудные тела месторождения сложены сульфидными медно-никелевыми рудами. Исходное содержание металлов в образцах руды: 6,08 % Ni; 1,2 % Cu; 0,17 % Co. Образцы руды размером 10–12 мм измельчались на планетарной шаровой мельнице марки «Pulverisette-5», компании Fritsch GmbH до 100 % контрольного класса – 0,05 мм. Затем измельченную руду разделяли путем классификации на ситовом грохоте марки «Analysette-3», модели PRO. Для образования рудной пульпы в эксперименте использовалась дистиллированная вода с плотностью 996 кг/м³ при 20 °С, pH = 5,39–5,5, Eh = 95 мВ.

Характеристика микроорганизмов. Доминирующими видами в пробе автохтонной смешанной бактериальной культуры были *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans* и *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. Накопление автохтонной культуры в количестве 438,5 г проводили 15 суток в асептических условиях в шейкер-инкубаторе при температуре 30 °С.

Экспериментальная установка. Экспериментальная установка, представленная на рисунке 1, включала три блока: блок 1 использовался для ультразвуковой обработки (актива-

ции) рудной пульпы; блок 2 использовался для накопления и активации автохтонной культуры; блок 3 использовался для бактериально-химического выщелачивания.

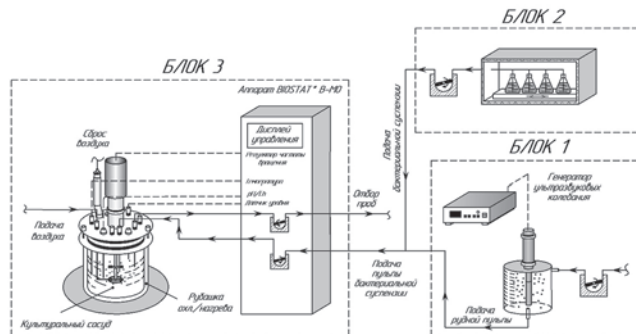


Рис. 1. Экспериментальная установка /
Fig. 1. Experimental setup

Блок 1 состоял из герметичного стального реактора с погруженным в него ультразвуковым излучателем. Размеры, частота колебаний и интенсивность излучения, создаваемые генератором ультразвуковых колебаний в реакторе, представлены в работе [1]. Максимальная потребляемая ультразвуковым генератором мощность составляла 400 Вт при диапазоне ее регулирования от 30 до 100 %. Блок 2 состоял из шейкер-инкубатора для культивирования бактериальной культуры и насоса, подающего бактериальную суспензию (693 г) смесь (инокулята и питательной среды (без железа) массой 254 г) к блоку 3. Блок 3 состоял из двух культуральных сосудов марки UniVessel Glass, 2L и двух аппаратов марки BIOSTAT* B-MO.

Условия эксперимента

Первый этап. Истертую стерилизованную сульфидную руду взвешивали (333 г), смешивали с дистиллированной водой в соотношении по массе (Т:Ж) 1:3 и насосом подавали в ультразвуковой реактор при интенсивности 23 Вт/см², продолжительность 1 800 с, откуда активированная рудная пульпа направлялась на смешение с бактериальной суспензией в культуральном сосуде (рис. 1), образуя пульпу бактериальной суспензии в соотношении Т:Ж – 1:5.

Второй этап эксперимента, продолжительностью 14 суток, проводился в культуральных сосудах № 1 (C1) и № 2 (C2) при температуре 30 °С и частоте примешивания 300 об/мин. Загрузка бактериальной суспензии с рудной пульпой, активированной ультразвуком, осуществлялась в C1. Загрузка бактериальной суспензии с рудной пульпой, не обработанной ультразвуком, осуществлялась в C2. Один раз в сутки осуществляли контроль параметров процесса.

Аналитические методы исследования. Величины pH и Eh измеряли с помощью портативного pH-метр/ионметр Mettler-Toledo Seven Compact S220. Прямой подсчет клеток осуществляли при помощи камеры Горяева. Численность клеток подсчитывали с помощью микроскопа на тринокулярном микроскопе марки «Микромед-3». Концентрации закисного Fe(II) и окисного железа Fe(III) в жидкой фазе пульпы определяли методом комплексонометрического титрования трилоном Б. Определение Ni, Cu и Co в жидкой и твердой фазах осуществляли атомно-абсорбционным методом при помощи спектрофотометра «6300 Shimadzu».

Результаты и обсуждение исследования

Проведенный эксперимент можно разделить на три этапа. На первом этапе процесса, длительностью 2 суток, микроорганизмы в обоих сосудах C1 и C2 прикреплялись к твердой поверхности минерала посредством контактного механизма с выделением внеклеточных полимерных соединений [18, 19], и, как следствие, количество планктонных клеток в жидкой фазе пульпы уменьшалось. На первом этапе процесса выщелачивание Ni, Cu, Co проходило химическим путем за счет H₂SO₄, изначально присутствующей в питательной среде, что согласуется с исследованиями [20]. На данном этапе существенных различий между экспериментами с использованием ультразвуковой активации рудной пульпы и без нее нет. Водородный показатель пульпы бактериальной суспензии, как и концентрация Fe(II) в ней, увеличивались, окислительно-восстановительный потенциал и концентрация Fe(III) уменьшались (рис. 2, 3). В соответствии с исследованиями в работе [21] для данного этапа характерно прямое бактериально-химическое выщелачивание.

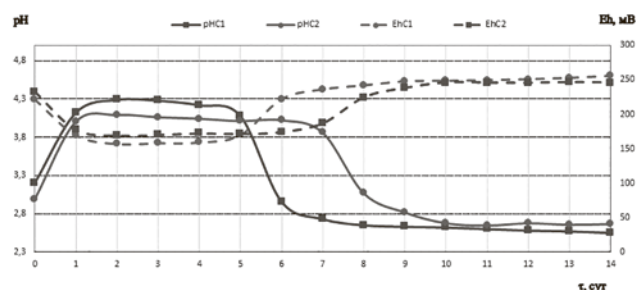


Рис. 2. Изменение pH, Eh пульпы бактериальной суспензии /
Fig. 2. Change in pH and Eh of bacterial suspension pulp

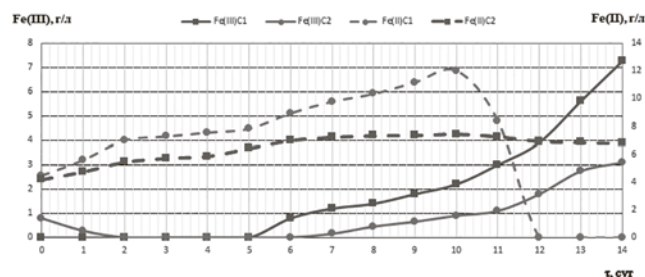


Рис. 3. Изменение концентрации Fe(III), Fe(II) пульпы бактериальной суспензии /
Fig. 3. Change in Fe(III) and Fe(II) concentrations of bacterial suspension pulp

На втором этапе эксперимента в сосуде C1, продолжительностью 3 суток, скорости выщелачивания были низкие: 112 мг/л·сутки – Ni; 9,3 мг/л·сутки – Cu; 0,67 мг/л·сутки – Co, что согласуется с фазой роста бактерий, их адаптацией к новым условиям, снижением активности размножения (рис. 4). Концентрация Fe(II) постепенно увеличивалась, значения pH (4,08–4,28) и Eh (158,3–169,9 мВ) почти не менялись. Концентрация Fe(III) была равна нулю. В C2 второй этап эксперимента имел продолжительность 5 суток. Показатели процесса на данном этапе вели себя аналогично показателям эксперимента в C1, однако концентрация Fe(II) была ниже на 0,8 г/л, pH – 3,86–4,06, Eh – 170–186,8 мВ, а скорости выщелачивания составили: 80,5 мг/л·сутки – Ni; 6,8 мг/л·сутки – Cu; 0,185 мг/л·сутки – Co.

В ходе третьего этапа в обоих культуральных сосудах

происходит экспоненциальный рост биомассы, а выщелачивание целевых металлов происходит биологическим путем. Для третьего этапа в соответствии с работами [21, 22] характерно кооперативное бактериально-химическое выщелачивание. Для С1 этап продолжался 9 суток (6–14-е сутки), для С2 – 7 суток (8–14-е сутки).

Изменения pH, Eh во времени пульпы бактериальной суспензии в сосудах С1 и С2 свидетельствуют о различной скорости и кинетики процессов выщелачивания (рис. 2). В сосуде С1 с 6-х суток происходило полное окисление закисного железа до окисного железа с одновременным ростом концентрации суммарного железа и количества бактерий. В сосуде С2 с 8-х суток до конца эксперимента этого не произошло. Количество бактерий и концентрация Fe(III) в сосуде С1 составили $0,356 \times 10^7$ кл/мл, 7,249 г/л, тогда как в С2 максимальная концентрация Fe(III) достигла значения 3,1 г/л, а количество бактерий – $0,26 \times 10^7$ кл/мл. Данные эксперимента свидетельствуют, что в культуральном сосуде №1 процессы окисления были более интенсивными.

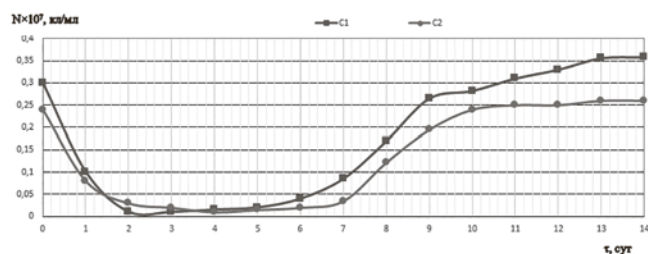


Рис. 4. Изменение численности бактериальной культуры пульпы бактериальной суспензии /
Fig. 4. Change in the number of bacterial culture of the pulp of bacterial suspension

Динамика роста микробной популяции отражает изменение количества только планктонных клеток в жидкой фазе

пульпы и не дает представления о микроорганизмах, прикрепленных к поверхности руды и также участвующих в ее выщелачивании [23]. Тем не менее сопоставление рисунков 2–4 позволяет проследить тесную взаимосвязь между развитием бактериальной биомассы и активностью окислительно-восстановительных процессов в пульпе.

Выводы

Результаты исследования показывают, что бактериально-химическое выщелачивание с использованием предварительной ультразвуковой активации рудной пульпы проходит с большей средней скоростью: в 1,83 раза – по Ni; в 2,83 раза – по Cu; в 3,86 раза – по Co, с большим извлечением: в 2,18 раза – по Ni; в 4,02 раза – по Cu; в 2,96 раза – по Co, чем выщелачивание без использования УЗИ. Это можно объяснить разрушением оксидных пленок с минеральных частиц рудной пульпы, образованием ювенильной поверхности, что повысило кинетику процесса.

Заключение

Проведено исследование процесса бактериально-химического выщелачивания сульфидных кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатский край, Россия) с использованием предварительной ультразвуковой обработки рудной пульпы и без нее. Исследование проводилось с целью увеличения кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания, увеличения извлечения Ni, Cu, Co.

Исследование показывает, что бактериально-химическое выщелачивание с использованием воздействия ультразвукового излучения ($22 \text{ кГц} \pm 1,65$, 23 Вт/см^2 , 1800 с) на рудную пульпу способствует увеличению скорости процесса: по Ni – в 1,83 раза, по Cu – в 2,83 раза, по Co – в 3,86 раза, способствует росту извлечения: по Ni – в 2,18 раза, по Cu – в 4,02 раза, по Co – в 2,96 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иодис В.А. Лабораторный реактор для ультразвукового воздействия на пульпу кобальт-медно-никелевой руды. *Горный журнал*. 2023; 81-87. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.13>.
Iodis V.A. Laboratory reactor for ultrasonic treatment of cobalt-copper-nickel ore pulp. *Mining Journal*. 2023; 12: 81-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.13>.
2. Трухин Ю.П., Иодис В.А. Разработка укрупненного проточного каскадного бактериально-химического реактора с УЗИ- и СВЧ-активацией для бактериально-химической переработки кобальт-медно-никелевых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; S19: 147-158. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_147.
Trukhin Yu.P., Iodis V.A. Development of a large-scale flow-through cascade bacterial-chemical reactor with ultrasound and microwave activation for bacterial-chemical processing of cobalt-copper-nickel ores. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; S19: 147-158. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_147.
3. Патент РФ № 2061066, 05.12.1993. Шестаков В.И., Нешков А.И., Волков В.П. Способ выщелачивания металлов из руд и устройство для его осуществления. 1996.
Patent of the Russian Federation No. 2061066, 05.12.1993. Shestakov V.I., Neshkov A.I., Volkov V.P. Method for leaching metals from ores and device for its implementation. 1996. (In Russ.).
4. Хмельев В.Н., Барсуков Р.В., Барсуков А.Р. и др. Ультразвуковой технологический аппарат с пятью рабочими инструментами различного диаметра для проведения научных исследований. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2022; 4 (44): 106-109.
Khmelev V.N., Barsukov R.V., Barsukov A.R., et al. Ultrasonic technological apparatus with five working tools of different diameters for conducting scientific research. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2022; 4 (44): 106-109. (In Russ.).
5. Подкаменный Ю.А., Кадырбекова Э.А. Теория и практика применения ультразвуковых воздействий в процессах обогащения рудного и нерудного сырья. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского*. 2021; 24: 172-179. <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2021.172>.
Podkamenny Yu.A., Kadyrbekova E.A. Theory and practice of using ultrasonic effects in the beneficiation of ore and non-metallic raw materials. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky*. 2021; 24: 172-179. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2021.172>.
6. Патент РФ № 2018134376, 28.09.2018. Секисов А.Г., Хрунина Н.П., Прохоров К.В., Рассказова А.В. Способ извлечения благородных металлов из руд и концентратов. 2019. Бюл. № 16.

- Russian Federation Patent No. 2018134376, September 28, 2018. Sekisov A.G., Khrunina N.P., Prokhorov K.V., Rasskazova A.V. Method for extracting precious metals from ores and concentrates. 2019. Bulletin No. 16. (In Russ.).
7. Li H., Li S., Peng J., et al. Ultrasound augmented leaching of nickel sulfate in sulfuric acid and hydrogen peroxide media. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018; 40: 1021-1030. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.031>.
 8. Hu Y., Guo P., Wang S., Zhang L. Leaching Kinetics of Antimony from Refractory Gold Ore in Alkaline Sodium Sulfide under Ultrasound. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020; 164: 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.029>.
 9. Lu J., Wang N., Yuan Z., et al. The effects of ultrasonic wave on heterogeneous coagulation and flotation separation of pentlandite-serpentine. *Minerals Engineering*. 2022; 188: 107828. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107828>.
 10. Gui Q., Fu L., Hu Y., et al. Oxidative pretreatment of refractory gold ore using persulfate under ultrasound for efficient leaching of gold by a novel eco-friendly lixiviant: Demonstration of the effect of particle size and economic benefits. *Hydrometallurgy*. 2023; 221: 106110. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106110>.
 11. Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. и др. Механизм влияния комбинированных энергетических воздействий на интенсификацию выщелачивания циркония и редкоземельных элементов из эвдиалитового концентрата. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017; 5: 105-112. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20170512>.
Chanturia V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., et al. Mechanism of influence of combined energy impacts on the intensification of leaching of zirconium and rare earth elements from eudialyte concentrate. *Physical and Technical Problems of Mineral Resource Development*. 2017; 5: 105-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRI20170512>.
 12. Патент РФ № 2080921, 10.06.1997. Сульман Э.М., Сульман М.Г., Матвеева В.Г. и др. Способ регенерации палладиевого катализатора гидрирования. 1997.
Russian Federation Patent No. 2080921, 10.06.1997. Sulman E.M., Sulman M.G., Matveeva V.G., et al. Method for regenerating palladium hydrogenation catalyst. 1997. (In Russ.).
 13. Муллакаев М.С., Асылбаев Д.Ф., Оганян Г.Б. и др. Ультразвуковая интенсификация процесса каталитического окисления меркаптанов. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2010; 9: 39-41.
Mullakaev M.S., Asylbaev D.F., Oganyan G.B., et al. Ultrasonic intensification of the process of catalytic oxidation of mercaptans. *Oil refining and petrochemistry*. 2010; 9: 39-41. (In Russ.).
 14. Oza R., Shah N., Patel S. Recovery of nickel from spent catalysts using ultrasonication-assisted leaching. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2011; 86 (10): 1276-1281. <https://doi.org/10.1002/jctb.2649>.
 15. Feng C.L., Zhang C., Yuan S.H., et al. Sustainable recovery of surface-deposited oils and valuable metals from uncashed spent hydroprocessing catalysts. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 338: 130564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130564>.
 16. Vyas S., Ting Y. Effect of ultrasound on bioleaching of hydrodesulphurization spent catalyst. *Environmental Technology & Innovation*. 2019; 14: 100310. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.01.004>.
 17. Иодис В.А. Активация, регенерация и переработка отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (3): 61-65. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.
Iodis V.A. Activation, regeneration, and recycling of spent catalysts using ultrasonic treatment. *Mine surveying and subsurface use*. 2025; 25 (3): 61-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.
 18. Sand W., Gehrke T., Jozsa P.-G., et al. (Bio)chemistry of bacterial leaching – direct vs. indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2001; 59 (2-3): 159-175. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00180-8).
 19. Rodriguez Y., Ballester A., Blazquez M.L. et al. New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature. *Hydrometallurgy*. 2003; 71: 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00174-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00174-9).
 20. Левенец О.О. Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных плотностях пульпы. *Вестник ДВО РАН*. 2014; 4: 96-100.
Levenets O.O. Bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore at different pulp densities. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014; 4: 96-100. (In Russ.).
 21. Tributsch H. Direct vs indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2001; 59: 177-185.
 22. Кузякина Т.И., Хайнасова Т.С., Левенец О.О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2008; 2 (12): 76-85.
Kuzyakina T.I., Khainasova T.S., Levenets O.O. Biotechnology of metal extraction from sulfide ores. *Vestnik KRAUNC. Earth Sciences*. 2008; 2 (12): 76-85.
 23. Shen L., Cheng J., Wang J., et al. Biofilm formation and development during the pyrite bioleaching of moderately thermophilic microorganisms. *Hydrometallurgy*. 2023; 222: 106183. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106183>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Артём Александрович Аврейцевич – аспирант Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), 683002, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация; e-mail: artem-032@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Artem A. Avreitsevich – postgraduate student of the Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (RGC FEB RAS), 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation; e-mail: artem-032@mail.ru

Валентин Алексеевич Иодис –

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Научно-исследовательский геотехнологический
центр Дальневосточного отделения Российской академии
наук (НИИГТЦ ДВО РАН), научный руководитель аспиранта,
683017, г. Петропавловск-Камчатский, Российская
Федерация; e-mail: iodisva@mail.ru

Критерии авторства:

А. А. Аврейцевич – сбор и анализ данных литературных источников, проведение экспериментальных исследований, определение параметров процессов, подготовка текста статьи, включая описательные методики, результатов и выводов, оформление таблиц и графиков, визуализация данных и корректность их анализа. В. А. Иодис – разработка концепции исследования, постановка целей и задач, научное руководство исследованием, консультации по методологии и интерпретации данных, участие в интерпретации результатов и их научном обосновании, рецензирование и редактирование текста статьи, внесение правок и дополнений, обеспечение научной строгости текста.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.11.2025

Поступила после рецензирования: 29.11.2025

Принята к публикации: 07.12.2025

Valentin A. Iodis –

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Research
Geotechnological Center; Far Eastern Branch of Russian
Academy of Sciences (RGC FEB RAS), postgraduate student's
supervisor, 683017, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian
Federation; e-mail: iodisva@mail.ru

Contribution:

A. A. Avreitsevich – collection and analysis of data from literary sources, conducting experimental studies, determining process parameters, preparing the text of the article, including descriptive methods, results and conclusions, designing tables and graphs, visualizing data and ensuring the correctness of their analysis. V. A. Iodis – development of the research concept, setting goals and objectives, scientific supervision of the research, consultations on methodology and data interpretation, participation in the interpretation of the results and their scientific justification, reviewing and editing the text of the article making edits and additions, ensuring the scientific rigor of the text.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 17.11.2025

Revised: 29.11.2025

Accepted: 07.12.2025