

Исследование изменений в морфологии окисленной поверхности сульфидной руды при ее ультразвуковой обработке

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. Исследованы изменения в морфологии окисленной в атмосферных условиях поверхности сульфидной руды после ее ультразвукового воздействия. Исследования изменений в морфологии поверхности шлифов подтвердили, что ультразвуковая обработка вызывает удаление пассивирующих пленок, значительно изменяет морфологию поверхности, вызывая ее повреждение, вызывая образование дефектов в виде каналов и кратеров. Эксперимент показал, что ультразвуковая обработка объемной интенсивностью от 0,44 до 0,78 Вт/см³ в течение 15 мин. поверхности шлифов удаляет оксидные пленки с поверхности пирротина и халькопирита только частично. При объемной интенсивности от 0,78 до 1 Вт/см³ оксидные пленки полностью разрушаются, пирротин и халькопирит подвержены большим изменениям в морфологии с образованием большого количества дефектов. При максимальной объемной интенсивности колебаний 1 Вт/см³ и увеличении продолжительности процесса обработки до 30 мин. количество каналов и кратеров на поверхности растет. Результаты исследований показывают, что ультразвуковая обработка рудных пульп может увеличить скорость процесса бактериально-химического окисления за счет существенного увеличения количества дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки, роста ее контактной площади и формы. Это позволит разработать инновационные, рентабельные технологии переработки сульфидных руд.

Ключевые слова: сульфидная руда, ультразвук, объемная интенсивность излучения, продолжительность, шлиф, оксидная (пассивирующая) пленка, морфология поверхности, дефект

Благодарности, признательность, финансирование: Авторы выражают благодарность научному сотруднику научно-исследовательского отдела НИГТЦ ДВО РАН И. А. Койдану за ценные рекомендации при подготовке статьи. Работа выполнена в рамках государственного задания НИГТЦ ДВО РАН № 075-00335-26-00, финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ.

Для цитирования: Аврейцевич А.А., Иодис В.А. Исследование изменений в морфологии окисленной поверхности сульфидной руды при ее ультразвуковой обработке. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 15-20. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-15-20>.

Study of changes in the morphology of the oxidized surface of sulfide ore during its ultrasonic treatment

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. The study was conducted to investigate changes in the morphology of atmospherically oxidized sulfide ore surfaces after ultrasonic treatment. Studies of the surface morphology of polished sections confirmed that ultrasonic treatment removes passivating films and significantly alters the surface morphology, causing damage and leading to the formation of defects such as channels and craters. The experiment showed that ultrasonic treatment of polished sections with a volumetric intensity of 0,44 to 0,78 W/cm³ for 15 minutes only partially removes oxide films from the surface of pyrrhotite and chalcopyrite. At a volumetric intensity of 0,78 W/cm³ to 1 W/cm³, the oxide films are completely destroyed, and pyrrhotite and chalcopyrite undergo significant changes in morphology, forming numerous defects. With a maximum volumetric oscillation intensity of 1 W/cm³ and an increase in the processing time to 30 minutes, the number of channels and craters on the surface increases. The results of the research show that ultrasonic treatment of ore pulps can increase the rate of bacterial-chemical oxidation by significantly increasing the number of defects in the surface layers

of the crystal lattice, increasing its contact area and shape. This will enable the development of innovative, cost-effective technologies for processing sulphide ores.

Keywords: sulfide ore, ultrasound, volumetric radiation intensity, duration, polished section, oxide (passivating) film, surface morphology, defect

Acknowledgments, funding, financial Support: The authors express their gratitude to I.A. Koydan, a research fellow at the research department of the RGC FEB RAS, for his valuable advice during the preparation of this article. This work was supported by state assignment №075-00335-26-00 to the RGC FEB RAS, funded by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation.

For citation: Avreitsevich A.A., Iodis V.A. Study of changes in the morphology of the oxidized surface of sulfide ore during its ultrasonic treatment. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 15-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-15-20>.

Введение

Одним из методов интенсификации физико-химических свойств рудных пульп для повышения эффективности извлечения полезных компонентов является акустическая (ультразвуковая) обработка, вследствие явлений кавитации – образования пузырьков парогазовой смеси в рудных пульпах и их схлопывания, сопутствующих эффектов – акустических течений, радиационного давления, электрических разрядов, кумулятивных струй [1–3].

Схлопывание кавитационных пузырьков на границе раздела фаз в зоне развитой кавитации создает локальные ударные волны с очень высокими амплитудами давления до 8 МПа и температуры до 10 тыс. К [4]. Акустические течения способны разрушить оксидные пленки на поверхности рудных частиц [5, 6]. Кумулятивные струи при воздействии на устья микротрещин рудных частиц способны вызвать их рост и диспергацию частиц [7, 8]. Кроме этого, ударные волны на поверхности рудных частиц способны вызывать увеличение плотности поверхностных дислокаций кристаллических решеток [9, 10], разрушение минеральных агрегатов с повышением удельной суммарной поверхности минеральных компонентов пульп [11, 12].

Совокупность следствий ультразвукового воздействия на минеральные компоненты пульп должно соответственно сопровождаться повышением кинетики процессов обогащения руд, таких как окислительное выщелачивание, бактериально-химическое окисление сульфидов металлов [13, 14]. Интенсификация бактериально-химических процессов с ультразвуковой активацией рудных пульп позволит разработать рентабельные, экологически безопасные технологии для переработки сульфидных кобальт-медно-никелевых руд месторождений никеленосных провинций Дальнего Востока.

Цель работы: исследование изменений в морфологии окисленной в атмосферных условиях поверхности сульфидной руды при ультразвуковой обработке с различными объемами интенсивностями.

Материал и методы исследования

При решении поставленных задач применялись такие методы, как обобщение, систематизация, сравнительный анализ, наблюдение и эксперимент.

Аппарат ультразвуковой обработки

Аппарат для проведения исследования имел возможность регулирования объемную интенсивность ультразвуковых колебаний от 0,44 до 1,67 Вт/м³ [15, 16]. Зона развитой кавитации аппарата ультразвуковой обработки (АУО) составляет ≈ 40–43 % от рабочего объема аппарата и занимает почти весь

объем под излучателем колебаний, при этом падение интенсивности в соответствии с расчетами по глубине аппарата составляет менее 1 %.

Аншлифы. Для исследования эффективности разрушения ультразвуком пассивирующих образований на поверхности сульфидов металлов использовались два аншлифа сульфидных руд. Аншлиф № 1 представляет собой амфиболит порфиридовый с вкраплениями сульфидов – пирротина ($\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$), халькопирита (CuFeS_2), пентландита ($(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{S}_4$), с содержанием, по данным полуколичественного спектрального анализа, целевых металлов: Ni – 0,015 %; Co – 0,005 %; Cu – 0,03 %; Zn – 0,0052 %. Аншлиф № 2 имеет вкрапления руды в амфиболовом габброиде зеленовато-серого цвета. Главный его минерал – пирротин. Акцессорные минералы – халькопирит, пирит (FeS_2), пентландит. Выделения пирротина, значительно окисленного, имеют размер от 0,5 мм, в пятнах – до 5×10 мм. Присутствует халькопирит ~ 2–3 %. Количество сульфидов в образце – 10–15 %. Химический анализ сульфидной руды образца показал следующее содержание металлов: Ni – 0,709 %; Co – 0,0139 %; Cu – 0,1047 %; Zn – 0,0052 %.

Дистиллированная вода. В эксперименте использовалась дистиллированная вода с плотностью 999 кг/м³ при 21 °С, pH воды варьировался в пределах 5,5–5,7, значение Eh составляло 97 мВ.

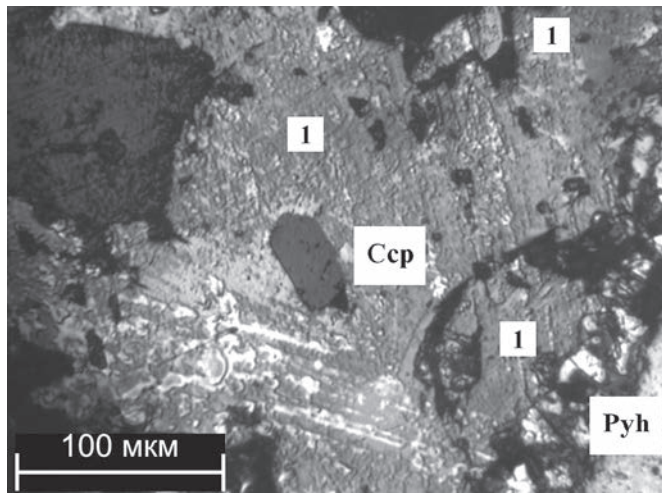
Описание эксперимента

В целях подтверждения эффективности снятия ультразвуком пассивирующих образований на поверхности кристаллов сульфидов металлов были выполнены эксперименты по ультразвуковому разрушению оксидных пленок, образованных на поверхности аншлифов в атмосферных условиях. Окисленные аншлифы устанавливались на дно АУО, сверху на который устанавливалась пьезоэлектрическая колебательная система с излучателем, при этом нижний конец излучателя располагался выше аншлифов на 7–8 см [15, 16]. Реактор заполнялся дистиллятом, без обеспечения его циркуляции. Во избежание роста температуры дистиллята вследствие трансформации акустической энергии, кавитационного эффекта, вязкостного трения в охлаждающий контур подавали воду с температурой 11 °С, объемным расходом 1,2 л/мин и включали генератор ультразвуковых колебаний с заданными объемными интенсивностями излучения – 0,44; 0,78; 1 Вт/см³. Продолжительность обработки при данных интенсивностях составляла 15 мин. После ультразвукового воздействия аншлифы вынимали из АУО и их поверхность исследовалась с помощью рудного поляризационного микроскопа.

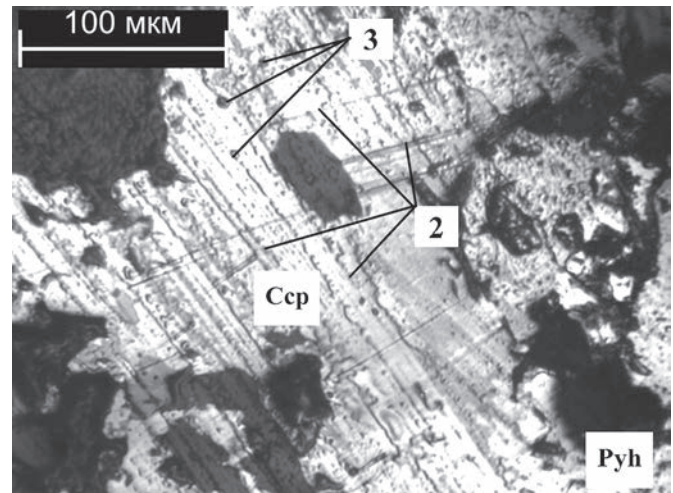
Результаты и обсуждение исследования

Анализ микроскопических кадров, представленных на рисунке 1, показал, что ультразвуковое воздействие объем-

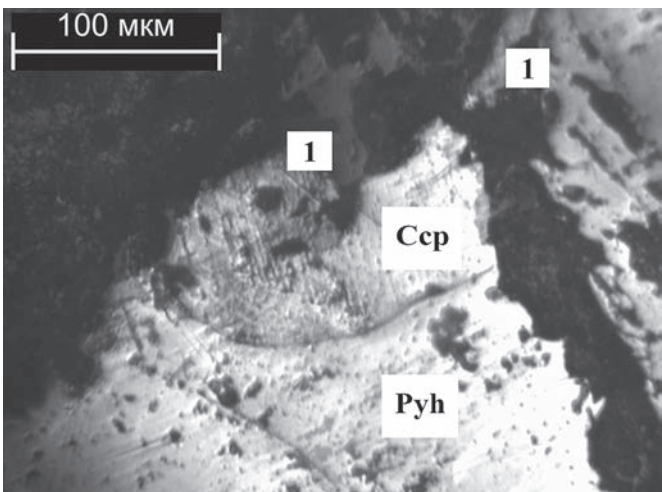
ной интенсивностью от 0,44 до 0,78 Вт/см³ в течение 15 мин. не полностью удаляет оксидные пленки, мало влияет на морфологию поверхности пирротина (рис. 1е).



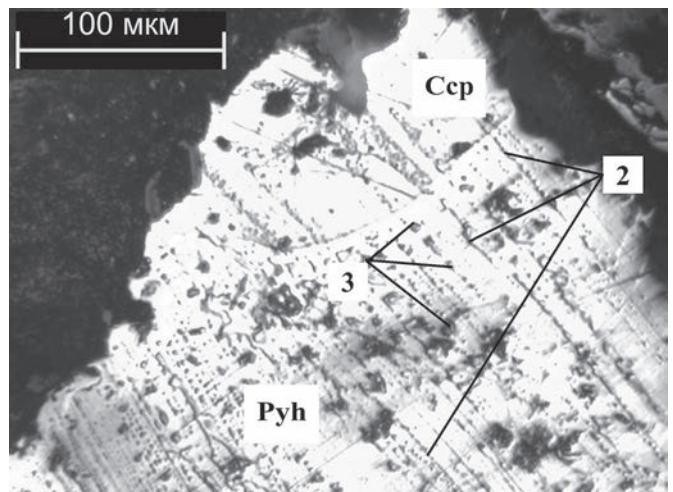
а (a)



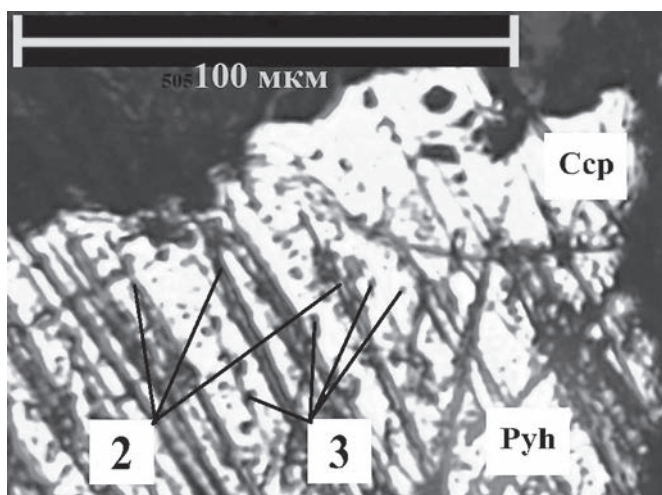
б (b)



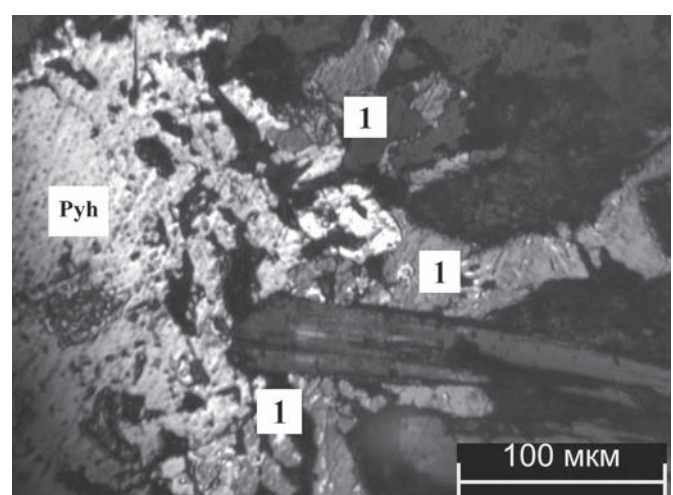
в (c)



г (d)



д (e)



е (f)

Рис. 1. Микроскопический кадр аншлифа №1 до и после ультразвуковой обработки с различными объемными интенсивностями: а, в – до обработки; б, г – после обработки 0,78 Вт/см³; д – после обработки 1 Вт/см³; е – после обработки 0,44 Вт/см³; 1 – оксидные пленки; 2 – образованные каналы; 3 – образованные кратеры; Pyh – пирротин; Ccp – халькопирит /

Fig. 1. Microscopic image of polished section №1 before and after ultrasonic treatment with different volume intensities: а, с – before treatment; б, d – after treatment with 0,78 W/cm³; е – after treatment with 1 W/cm³; f – after treatment with 0,44 W/cm³; 1 – oxide films; 2 – formed channels; 3 – formed craters; Pyh – pyrrhotite; Ccp – chalcopyrite

При интенсивности $0,78 \text{ Вт/см}^3$ пассивирующие пленки, образованные в атмосферных условиях, удаляются с образованием на поверхности дефектов: каналов и кратеров (рис. 1б, 1г). Рост объемной интенсивности до 1 Вт/см^3 увеличил количество механических дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки, их размеры (рис. 1д). При этом пирротин претерпевает более выраженные морфологические изменения поверхности по сравнению с халькопиритом, что возможно обусловлено различиями морфологии кристаллов [17].

Результаты эксперимента полностью подтвердились при ультразвуковой обработке окисленного в атмосферных условиях аншлифа № 2 (рис. 2), где при объемной интенсивности ультразвука $\geq 0,78 \text{ Вт/см}^3$ были удалены пассивирующие пленки, наблюдались изменения в морфологии поверхности (рис. 2б, 2в). Как и в эксперименте с аншлифом № 1, рост интенсивности воздействия, увеличение продолжительности обработки (рис. 3) ведут к увеличению количества дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки.

Наблюдаемые значительные изменения в морфологии поверхности пирротина и халькопирита при ультразвуковой

обработке, характеризующиеся их сильным повреждением, образованием дефектов в виде многочисленных каналов и кратеров (рис. 1д, 2в, 3), будут способствовать увеличению площади контакта сульфидов с бактериальной суспензией, что может увеличить кинетику процесса бактериально-химического выщелачивания.

Микроскопические исследования поверхностей аншлифа подтверждают, что в зоне развитой кавитации АУО, происходит эффективное разрушение поверхностных, окисдных пленок, образование дефектов в поверхностных слоях кристаллической решетки. Об этом свидетельствуют результаты данных исследований и результаты исследований [18, 19], где по данным микроанализа обнаружено, что в результате ультразвуковой обработки с поверхности пирротина, халькопирита полностью удаляются окисленные слои (оксиды / гидроксиды железа, полисульфидные соединения), на поверхности образуются многочисленные каналы и кратеры, что ведет к росту контактной поверхности, а это в свою очередь может увеличить кинетику биоэлектрохимических процессов контактного бактериально-химического окисления сульфидов металлов [14].

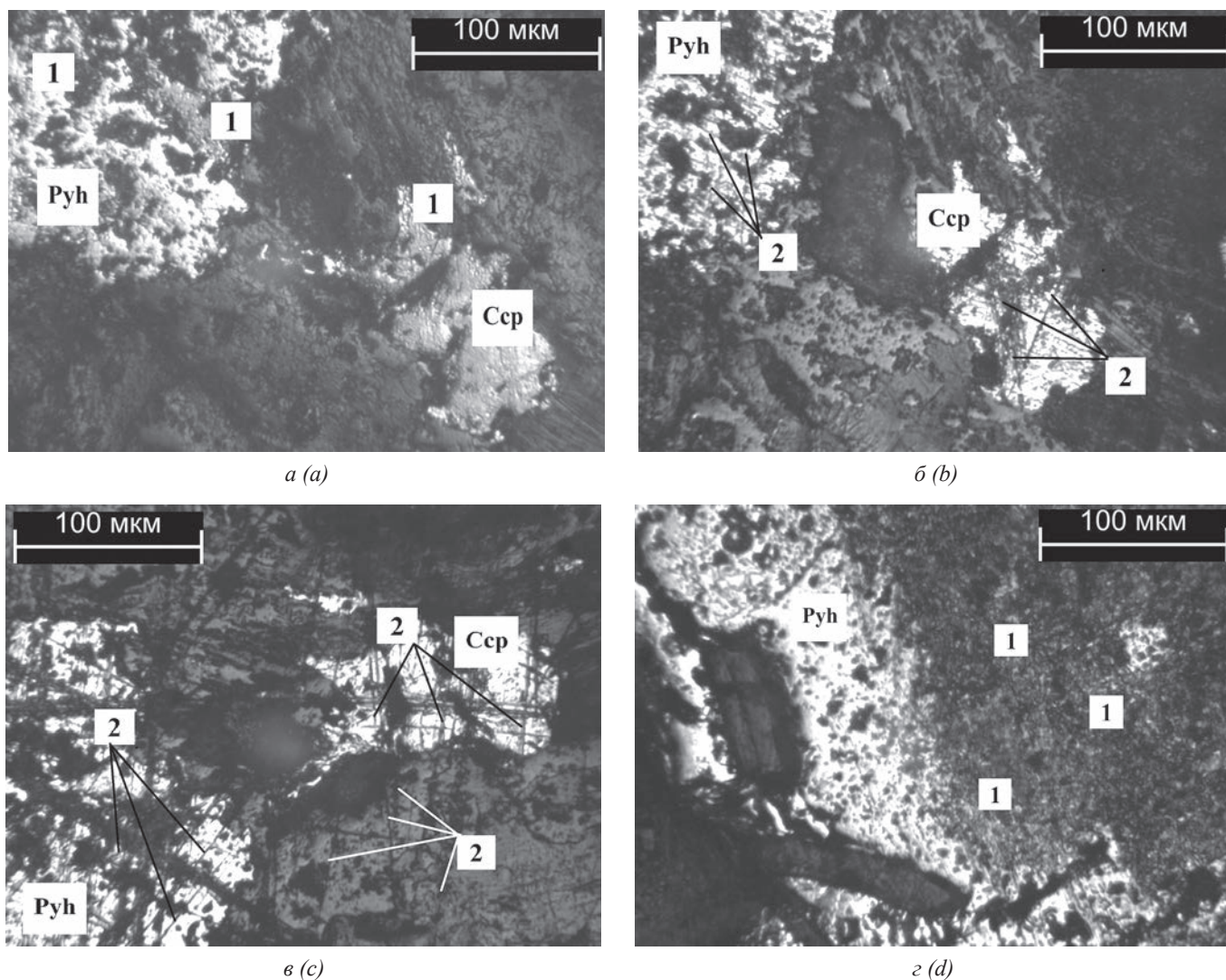


Рис. 2. Микроскопический кадр аншлифа № 2 до и после ультразвуковой обработки с различными объемными интенсивностями: а - до обработки; б - после обработки $0,78 \text{ Вт/см}^3$; в - после обработки 1 Вт/см^3 ; г - после обработки $0,44 \text{ Вт/см}^3$; 1 - оксидные пленки; 2 - образованные каналы; Pyh - пирротин; Ccp - халькопирит /

Fig. 2. Microscopic image of polished section No. 2 before and after ultrasonic treatment with different volume intensities: a - before treatment; b - after treatment with $0,78 \text{ W/cm}^3$; c - after treatment with 1 W/cm^3 ; d - after treatment with $0,44 \text{ W/cm}^3$; 1 - oxide films; 2 - formed channels; Pyh - pyrrhotite; Ccp - chalcopyrite

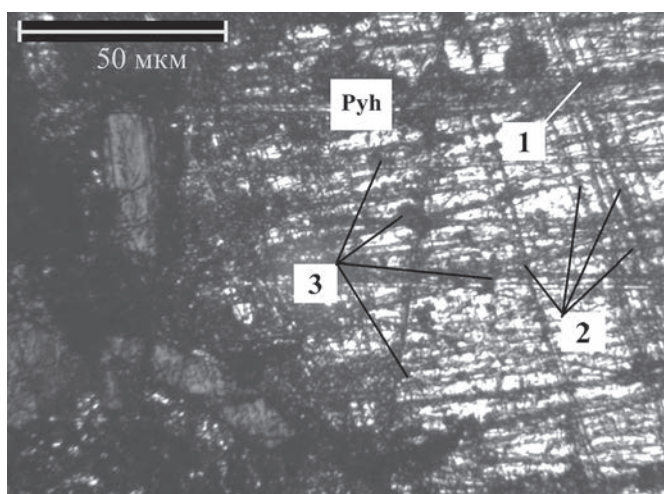


Рис. 3. Механические дефекты, образованные на поверхности пирротина после ультразвукового воздействия (1 Вт/см³, 30 мин.): 1 – трещина; 2 – канал; 3 – кратер /

Fig. 3. Mechanical defects formed on the surface of pyrrhotite after ultrasonic irradiation (1 W/cm³, 30 min): 1 – crack; 2 – channel; 3 – crater

Заключение

1. Исследования изменений в морфологии окисленной в атмосферных условиях поверхности аншлифов сульфидной руды после ультразвукового воздействия подтвердили, что ультразвуковая обработка вызывает удаление оксидных пленок, значительно изменяет морфологию поверхности, вызывая повреждение поверхности, образование дефектов в виде каналов и кратеров.

2. Эксперимент показал, что ультразвуковая обработка объемной интенсивностью от 0,44 до 0,78 Вт/см³ в течение 15 мин. поверхности аншлифа удаляет оксидные пленки с поверхности пирротина и халькопирита только частично. При объемной интенсивности от 0,78 Вт/см³ и выше пирротин и халькопирит подвержены большим изменениям в морфологии.

3. Результаты исследований показывают, что ультразвуковая обработка рудных пульп может увеличить кинетику процесса бактериально-химического окисления, что позволит разработать экологические, рентабельные технологии переработки сульфидных руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Iodis V.A., Koydan I.A. Investigation of oxide films removal process from the ore pulp particle surface during its ultrasonic treatment. *Non-Ferrous Metals*. 2024; 1: 8-12. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.02>.
- Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Шалунов А.В. и др. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред. *Ползуновский вестник*. 2017; 4: 123-128.
Golykh R.N., Khmlev V.N., Shalunov A.V., et al. Identification of optimal conditions for ultrasonic cavitation treatment of highly viscous and non-Newtonian liquid media. *Polzunov bulletin*. 2017; 4: 123-128. (In Russ.).
- Голых Р.Н., Минаков В.Д. Разработка исследовательского стенда для изучения влияния ударно-волнового давления как независимого фактора ультразвукового кавитационного воздействия. *Ползуновский вестник*. 2024; 1: 191-196. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.023>.
Golykh R.N., Minakov V.D. Development of a research rig for studying the influence of shock-wave pressure as an independent factor of ultrasonic cavitation action. *Polzunov bulletin*. 2024; 1: 191-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.023>.
- Bao S., Chen B., Zhang Y., et al. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Application, mechanisms and prospects. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023; 98: 106525. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106525>.
- Гроо Е.А., Алгебраистова Н.К., Жижжаев А.М. и др. Исследование влияния ультразвуковой обработки для интенсификации процессов извлечения золота из труднообогатимого сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012; 2: 89-96.
Groo E.A., Algebraistova N.K., Zhizhaev A.M., et al. Study of the influence of ultrasonic treatment for intensifying gold extraction processes from refractory raw materials. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012; 2: 89-96. (In Russ.).
- Lin Q., Sun L., Cao Y., et al. Effect of ultrasonic treatment on the surface hydrophobicity of pyrite: Properties and mechanism of ultrasonic products. *Minerals Engineering*. 2025; 233: 109661. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109661>.
- Лунин Б.С., Николаев А.Л. Изменение рельефа поверхности кварцевого стекла при ультразвуковой обработке. *Неорганические материалы*. 2023; 59 (3): 317-322. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23030090>.
Lunin B.S., Nikolaev A.L. Changes in the surface relief of quartz glass during ultrasonic treatment. *Inorganic Materials*. 2023; 59 (3): 317-322. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002337X23030090>.
- 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/FTPRPI20170512>.
Chanturia V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., et al. Mechanism of influence of combined energy impacts on intensification of leaching of zirconium and rare earth elements from eudialyte concentrate. *Physicotechnical Problems of Mineral Development*. 2017; 5: 105-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20170512>.
- 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>.
- Cao D., Xu X., Jiang S. Ultrasound-electrochemistry enhanced flotation and desulphurization for fine coal. *Separation and Purification Technology*. 2021; 258: 117968. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117968>.
- Pan W., Yi R., Liao Z., Yang L. Experimental study on microbial desulphurization of sulfide ores and self-heating simulation of ore heaps under ultrasonic and microwave. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 164: 435-448. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.033>.
- Lim M.S.W., Yang T.C.K., Yap Y.H., et al. Intensification and optimisation of nickel recovery from spent hydrogenation catalysts via ultrasound-augmented hydrometallurgy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021; 9: 105771. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105771>.
- Wang J., Faraji F., Ghahreman A. Effect of ultrasound on the oxidative copper leaching from chalcopyrite in acidic ferric sulfate media. *Minerals*. 2020; 10 (7): 633. <https://doi.org/10.3390/min10070633>.
- Трухин Ю.П., Иодис В.А., Хайнасова Т.С. СВЧ и УЗИ активация кинетики бактериально-химических процессов выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; 11 (19): 113-123. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_113.

- Trukhin Yu.P., Iodis V.A., Khainasova T.S. Microwave and ultrasound activation of the kinetics of bacterial-chemical processes of leaching cobalt-copper-nickel ores of the Shanuch deposit. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 11 (19): 113-123. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_11_19_113.
15. Иодис В.А. Лабораторный реактор для ультразвукового воздействия на пульпу кобальт-медно-никелевой руды. *Горный журнал*. 2023; 12: 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>.
16. Хмелев 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. <https://doi.org/10.25699/SSSB.2022.44.4.003>.
- Khmelev V.N., Barsukov R.V., Barsukov A.R., et al. Ultrasonic technological apparatus with five working tools of different diameters for scientific research. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2022; 4 (44): 106-109. (In Russ.). <https://doi.org/10.25699/SSSB.2022.44.4.003>.
17. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. Екатеринбург, 2007: 720.
- Betechtin A.G. Course of mineralogy. Ekaterinburg, 2007: 720. (In Russ.).
18. Liao Y., Zhao G., Feng B., et al. Application of ultrasonic pre-treatment for flotation separation pyrrhotite from chlorite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023; 669 (3): 131507. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131507>.
19. Hassanzadeh A., Gholami H., Ozkan S.G., et al. Effect of power ultrasound on wettability and collectorless floatability of chalcopyrite, pyrite and quartz. *Minerals*. 2021; 11(1) (48): 1-16. <https://doi.org/10.3390/min11010048>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Артём Александрович Аврейтевич –

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

Валентин Алексеевич Иодис –

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИИГТЦ ДВО РАН)», научный руководитель аспиранта, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация; iodisva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>

Критерии авторства:

А. А. Аврейтевич – сбор и анализ данных литературных источников, проведение экспериментальных исследований, определение параметров процесса, подготовка текста статьи, включая описательные методики, результатов и выводов, оформление рисунков, 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, проведение экспериментальных исследований, 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: 12.03.2026

Поступила после рецензирования: 24.05.2026

Принята к публикации: 30.05.2026

ABOUT THE AUTHORS

Artem A. Avreitovich –

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

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, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation; iodisva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>

Contribution:

A. A. Avreitovich – 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 figures, 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, conducting experimental studies, participation in the interpretation of results and their scientific justification, reviewing and editing the text of the article, making corrections and additions, ensuring the scientific rigor of the text.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 12.03.2026

Revised: 24.05.2026

Accepted: 30.05.2026