

Изучение влияния СВЧ-волн на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной руды

Р. С. Вопилин, 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. Работа выполнена с целью изучения влияния СВЧ-волн различной объемной интенсивности (3, 4,54 и 5,3 Вт/см³) на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч при различной продолжительности воздействия (60–480 с). Эксперимент показал, что СВЧ-обработка объемной интенсивностью 3 Вт/см³ (180 с) и 4,54 Вт/см³ (360 с) не вызывает визуально видимых структурных изменений на поверхности частиц сульфидной руды. Увеличение объемной интенсивности до 5 Вт/см³ при продолжительности 300 с вызывало как раскрытие существующих микротрещин, так и их образование. Эксперименты показали, что температура руды при объемной интенсивности излучения 3 Вт/см³ (480 с) обработки достигла 426,2 °С. При 4,54 Вт/см³ температура руды составила 476,4 °С через 360 с. При максимальной интенсивности температура достигла 468,2 °С через 300 с. При дальнейшей СВЧ-обработке с указанными объемными интенсивностями фиксировались нелинейный рост температуры, замедление ее роста и стабилизация, что свидетельствовало о начале фазовых превращений в руде. Определена зависимость удельной теплоемкости руды от продолжительности процесса при трех данных объемных интенсивностях воздействия. Обработка частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч сверхвысокочастотным излучением позволит за счет раскрытия, формирования микротрещин и роста контактной поверхности облегчить их последующую переработку, в частности интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания с целью выделения из них целевых компонентов.

Ключевые слова: сульфидная руда, СВЧ-волна, микроволновое излучение, объемная интенсивность излучения, продолжительность, микротрещина, термомеханические напряжения, тепловое расширение

Благодарности: Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Ю. П. Трухину за руководство научной работой, научному сотруднику И. А. Койдану за ценную помощь в проведении микроскопических исследований.

Для цитирования: Вопилин Р.С., Иодис В.А. Изучение влияния СВЧ-волн на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной руды. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 9-14. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-9-14>.

Study of the influence of microwaves on selective disintegration of sulfide ore particles

R. S. Vopilin, 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 aim of this study was to investigate the effect of microwaves of varying volumetric intensities (3, 4,54, and 5,3 W/cm³) on the selective disintegration of cobalt-copper-nickel sulfide ore particles from the Shanuch deposit at varying exposure times (60 – 480 s). The experiment demonstrated that microwave treatment with volumetric intensities of 3 W/cm³ (180 s) and 4,54 W/cm³ (360 s) does not cause visually visible structural changes on the surface of the sulfide ore particles. Increasing the volumetric intensity to 5 W/cm³ for 300 s caused both the opening of existing microcracks and their formation. Experiments showed that the ore temperature at a volumetric radiation intensity of 3 W/cm³ reached 426,2 °C after 480 s of treatment. At 4,54 W/cm³, the ore temperature reached 476,4 °C after 360 s. At maximum intensity, the temperature reached 468,2 °C after 300 s. With further microwave treatment at these intensities, a nonlinear increase in temperature was recorded, followed by a slowdown and stabilization, indicating the onset of phase transformations in the ore. The dependence of the ore's specific heat capacity on the process duration

was determined at these three volumetric intensities. The treatment of particles of cobalt-copper-nickel sulfide ore from the Shanuch deposit with microwave radiation will facilitate subsequent processing by opening, forming microcracks and increasing the contact surface, in particular by intensifying the process of bacterial-chemical leaching, with the aim of isolating target components from them.

Keywords: sulfide ore, microwave wave, microwave radiation, volumetric radiation intensity, duration, microcrack, thermomechanical stresses, thermal expansion

Acknowledgments: The authors express their gratitude to doctor of technical sciences, professor Yu.P. Trukhin for supervision of the scientific work, and to research associate I.A. Koydan for valuable assistance in conducting microscopic studies.

For citation: Vopilin R.S., Iodis V.A. Study of the influence of microwaves on selective disintegration of sulfide ore particles. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 9-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-9-14>.

Введение

Анализ литературных источников по существующим технологиям обогащения полезных ископаемых позволяет говорить о ряде преимуществ СВЧ-технологий перед традиционными процессами, основанными на дроблении, измельчении, для которых характерны высокие энергозатраты, большие потери целевых компонентов (металлов).

Уникальность использования микроволновых технологий для обогащения руд состоит в их селективном воздействии на разные минералы руды вследствие разной реакции на диэлектрический нагрев [1]. Исследования показали, что многие целевые минералы: пирротин, халькопирит, пирит, пентландит, виоларит – поглощают сверхвысокочастотное излучение и нагреваются, а минералы пустой породы: кварц, кальцит, фторапатит – прозрачны для СВЧ-волн. Селективный нагрев материала, сопровождающийся термическим расширением, приводит к образованию термомеханических напряжений, увеличению ширины раскрытия микротрещин, их образованию, формированию микронарушений на границе зерен, росту в них плотности дислокаций [2–5]. При этом размер данных дефектов зависит не только от интенсивности / продолжительности излучения, но и от минералогического состава, текстуры руды [6]. Раскрытие микротрещин, их образование способствует дезинтеграции минерала, что обеспечивает доступ выщелачивающего агента к ценным компонентам руды и увеличивает эффективность извлечения металла в процессах кислотного, бактериально-химического выщелачивания [7]. Данный эффект может возникнуть при выходных мощностях микроволнового излучения от 0,147 до 7 кВт, в течение 0,5–200 мин., с температурой нагрева рудных фаз от 25 до 750 °C [8, 9].

Цель работы: изучение влияния СВЧ-волн различной интенсивности на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при различной продолжительности воздействия.

Материал и методы исследования

Руда. Для исследования образования микротрещин, их раскрытия вследствие термомеханических напряжений на поверхности сульфидов металлов использовалась измельченная окисленная сульфидная кобальт-медно-никелевая руда месторождения Шануч [10]. Степень измельчения руды 100 % класса – 100 мкм. Исходное содержание металлов в образце руды: 3,1 % Ni; 0,48 % Cu; 0,1 % Co. Сульфиды представлены пирротинном ($\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$), пиритом (FeS_4), виоларитом (FeNi_2S_4), халькопиритом (CuFeS_2), пентландитом ($\text{Fe, Ni}_3\text{S}_4$).

СВЧ-нагреватель. В качестве СВЧ-нагревателя использовалась микроволновая печь марки MWD-201 WH номинальной потребляемой мощностью 1 100 кВт, максим-

альной выходной мощностью излучения – 700 Вт, частотой – 2 450 МГц, полезным объемом – 16,8 л.

Описание эксперимента

В целях подтверждения исследования образования микротрещин на поверхности сульфидов металлов были выполнены эксперименты по СВЧ-воздействию на измельченную кобальт-медно-никелевую руду.

Образцы руды размером 10 мм измельчались на планетарной шаровой мельнице, затем измельченную руду разделяли путем классификации на ситовом грохоте. Руду массой 200 г засыпали в термостойкую стеклянную емкость объемом 132 мл, которую устанавливали в центр микроволновой печи.

Объемные интенсивности излучения при соответствующих выходных мощностях излучения 400, 600 и 700 Вт составляли 3, 4,54 и 5,3 Вт/см³ соответственно. Максимальная продолжительность обработки (400 Вт) при данных интенсивностях составляла 480 с, 360 с (600 Вт), минимальная – 300 с (700 Вт). Для каждого режима (интенсивность/ продолжительность) эксперимент повторялся три раза. В течение всех экспериментов каждые 60 с фиксировалась температура в центре слоя руды измерителем температуры марки ИРТ-4/16-Т с термоэлектрическим преобразователем температуры типа L (ТХК). После воздействия СВЧ-излучения руду вынимали, и ее поверхность исследовалась с помощью рудного поляризационного микроскопа. Для получения микроскопических кадров одних и тех же частиц до и после СВЧ-обработки в боросиликатном жаропрочном стекле (2 × 5 см) были высверлены, а затем отшлифованы углубления для 24 частиц руды высотой 2 мм, диаметром 4 мм.

Результаты исследований и обсуждение

Анализ микроскопических кадров, представленных на рисунках 1а–1г, показал, что СВЧ-воздействие объемной интенсивностью обработки 3 Вт/см³ (180 с), 4,54 Вт/см³ (240 с) не вызывает визуально видимых структурных изменений на поверхности частиц сульфидной руды.

Увеличение продолжительности микроволновой обработки интенсивности 4,54 Вт/см³ до 360 с также не показало визуально заметных структурных изменений на поверхности частиц (рис. 1д, 1е). Однако увеличение объемной интенсивности до 5 Вт/см³ при продолжительности 300 с (рис. 1ж, 1з) вызвало как раскрытие уже существующих трещин, так и образование микротрещин.

Увеличение продолжительности воздействия СВЧ-волн максимальной интенсивности до 600 с привело к разрушению частицы руды (рис. 2).

Микроскопические исследования подтверждают, что структурные изменения частиц руды, а именно раскрытие микротрещин, микрорастрескивание, вследствие высоких

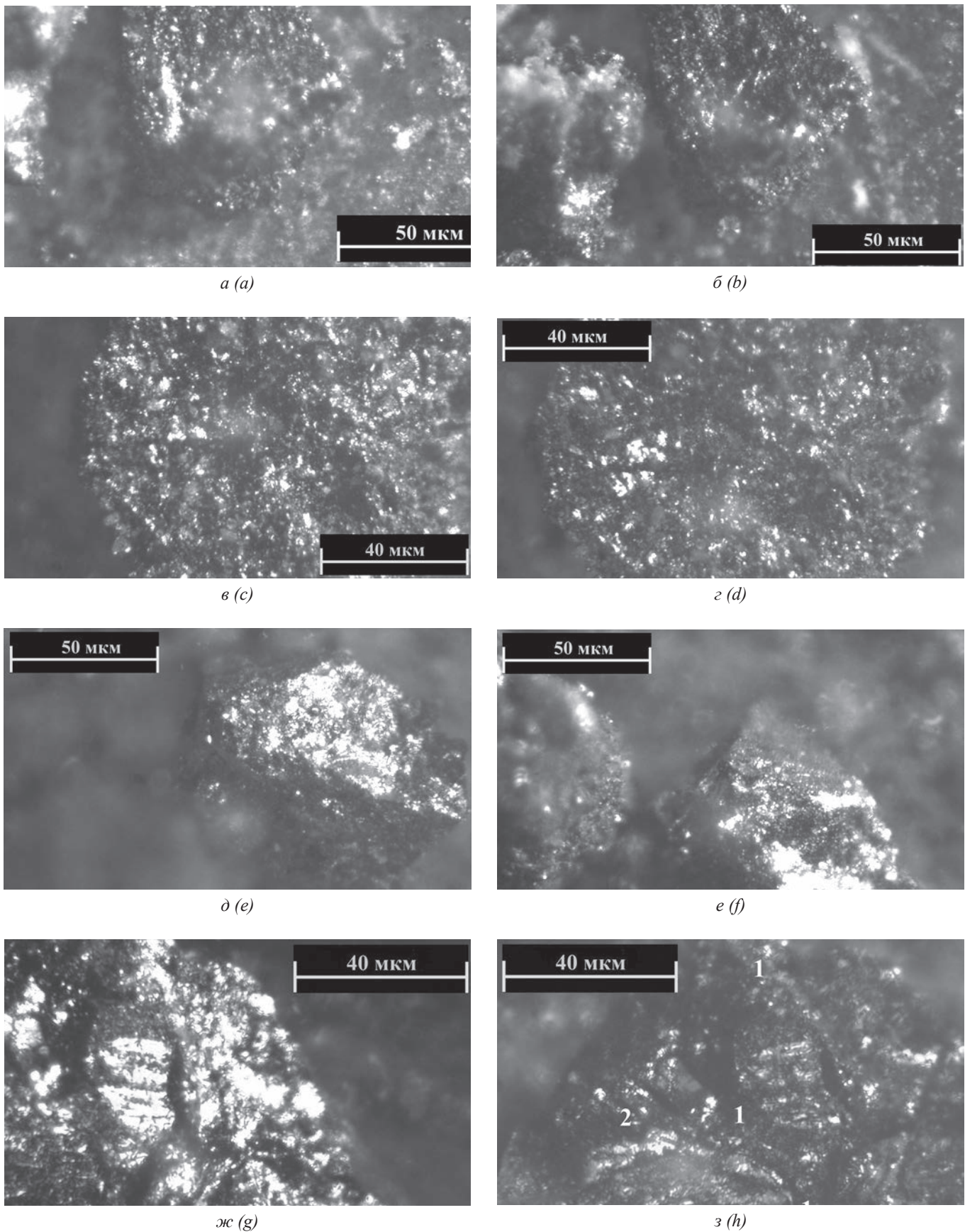


Рис. 1. Микроскопические кадры частиц сульфидной руды до и после СВЧ-воздействия: а, в, д, ж – до обработки; б – после обработки 400 Вт/см³(180 с); г – после обработки 600 Вт/см³(240 с); е – после обработки 600 Вт/см³(360 с); з – после обработки 700 Вт/см³(300 с); 1 – раскрытие микротрещин; 2 – образованные микротрещины /

Fig. 1. Microscope images of sulfide ore particles before and after microwave exposure: а, в, д, ж – before treatment; б – after treatment at 400 W/cm³ (180 s); д – after treatment at 600 W/cm³ (240 s); ф – after treatment at 600 W/cm³ (360 s); h – after treatment at 700 W/cm³ (300 s); 1 – opening of microcracks; 2 – formed microcracks

термомеханических напряжений, является результатом различного теплового расширения минералов в частицах руды под воздействием микроволн [11]. Разрушение идет по границам раздела минералов, местам включений, спайкам кристаллов и другим дефектам [12].

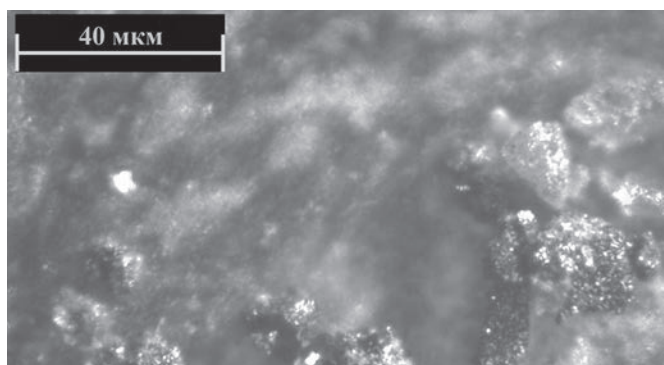


Рис. 2. Микроскопический кадр разрушенной частиц сульфидной руды после СВЧ-воздействия (5,3 Вт/см³, 600 с) /

Fig. 2. Microscope image of destroyed sulfide ore particles after microwave exposure (5,3 W/cm³, 600 s)

Обработка частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч сверхвысокочастотным излучением позволит за счет формирования на их поверхности микротрещин и роста контактной поверхности облегчить их последующую переработку, в частности интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания с целью выделения из них целевых компонентов [13–16].

Анализ, исследование образования микронарушений сплошности горных пород в условиях распространения в их объеме СВЧ-волн требует фиксации температур руды в течение эксперимента. Эксперименты показали, что температура руды при объемной интенсивности излучения 3 Вт/см³ за 480 с обработки достигала 426,2 °С. При 4,54 Вт/см³ температура микроволнового воздействия составила 476,4 °С через 360 с. При максимальной интенсивности температура достигала 468,2 °С через 300 с. При дальнейшей СВЧ-обработке с данными интенсивностями фиксировался нелинейный рост температуры, замедление ее роста – стабилизация, что свидетельствовало о начале фазовых превращений в руде [6].

Замеры температуры в центре слоя руды позволили определить зависимости температуры нагрева и удельной теплоемкости от времени.

Удельную теплоемкость, кДж/кг·°С определяли калориметрическим методом:

$$c = \frac{P \cdot \tau}{\Delta t \cdot M}, \quad (1)$$

где P – выходная мощность излучения, Вт;

τ – продолжительность воздействия, с;

Δt – нагрев частиц руды, °С;

M – масса руды, 0,2 кг.

Начальную теплоемкость руды определяли калориметрическим методом с использованием измерителя плотности теплового потока марки ИПП-2.

Нахождение обобщенной зависимости $c(\tau)$ для трех режимов эксперимента позволит в дальнейшем определять температуру нагрева руды в любой момент продолжительности эксперимента (рис. 3).

Эксперимент показал, что теплоемкость при нагревании СВЧ-волнами увеличивается линейно в температурном диапазоне 22,3–476,4 °С, что подтверждается работами [17].

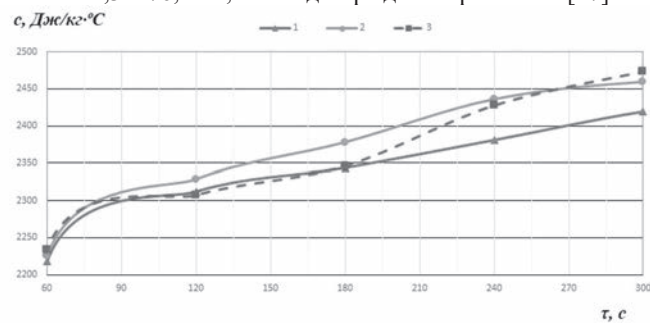


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости от продолжительности СВЧ-воздействия: 1–3 Вт/см³; 2–4,54 Вт/см³; 3–5 Вт/см³ /

Fig. 3. Dependence of specific heat capacity on the duration of microwave exposure: 1–3 W/cm³; 2–4,54 W/cm³; 3–5 W/cm³

На основе экспериментальных данных получены уравнения для трех режимов различной выходной мощности СВЧ излучения:

$$c(\tau) = -0,00212\tau^2 + 1,549\tau + 2140; \quad (2)$$

$$c(\tau) = -0,00304\tau^2 + 2,051\tau + 2116; \quad (3)$$

$$c(\tau) = 0,00125\tau^2 + 0,588\tau + 2192; \quad (4)$$

и обобщенная зависимость:

$$c(\tau) = -0,000928\tau^2 + 1,202\tau + 2159. \quad (5)$$

Закключение

1. Изучение влияния СВЧ-волн различной интенсивности на селективную дезинтеграцию частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при различной продолжительности воздействия показало, что воздействие микроволновой энергией на частицы руды вызывает их структурное изменение – раскрытие микротрещин, растрескивание вследствие термомеханических напряжений, различного теплового расширения минералов.

2. Предварительная обработка частиц сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч сверхвысокочастотным излучением позволит за счет формирования на их поверхности микротрещин и роста контактной поверхности облегчить их последующую переработку, в частности интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания с целью выделения из них целевых компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Jones D.A., Kingman S.W., Whittles D.N., et al. Understanding microwave assisted breakage. *Minerals Engineering*. 2005; 18 (7): 659–669.
2. Chen J., Li X., Gao L., et al. Microwave Treatment of Minerals and Ores: Heating Behaviors, Applications, and Future Directions. *Minerals*. 2024; 14 (219): 1–14. <https://doi.org/10.3390/min14030219>.
3. Lin F., Wang Z., Ao Y., et al. A high-power microwave continuous cracking system for hard ores. *Ain Shams Engineering Journal*. 2025; 16: 103440. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103440>.

4. Tian X., Forster J., Bobicki E.R. Technological and economic considerations for the application of combined microwave assisted comminution and multi-sensor ore sorting. *Minerals Engineering*. 2024; 208: 108582. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108582>.
5. Giyani B.F., Batchelor A.R., Kingman S.W. Microwave-enhanced heap leaching of porphyry copper ores: Part 1 – The role of mineralogy in microwave-induced fracture networking measured by X-ray computed tomography. *Minerals Engineering*. 2025; 233: 109589. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109589>.
6. Винников В.А., Землянский Г.С. Исследование изменения величины плотности дислокаций в зернах пирита при его нагреве сверхвысокочастотным излучением. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025; 12: 42-51. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_12_0_42.
Vinnikov V.A., Zemlyansky G.S. A study of changes in the dislocation density in pyrite grains upon heating with microwave radiation. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2025; 12:42-51. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_12_0_42.
7. 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.
8. Вopiлин P.C. Выщелачивание руд с использованием СВЧ излучения. *Недропользование XXI век*. 2025; 4 (108): 98-107.
Vopilin R.S. Leaching of ores using microwave radiation. *Subsoil use XXI century*. 2025; 4 (108): 98-107. (In Russ.).
9. Iodis V.A. Methods of ore processing by microwave radiation. *Non-Ferrous Metals*. 2023; 2: 14-18. <https://doi.org/10.17580/nfm.2023.02.03>.
10. Кунгурова В.Е. Минеральный и химический состав сульфидной медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка). *Геология, география и глобальная энергия*. 2018; 4 (71): 99-110.
Kungurova V.E. Mineral and chemical composition of sulfide copper-nickel ore of the Shanuch deposit (Kamchatka). *Geology, Geography and Global Energy*. 2018; 4 (71): 99-110. (In Russ.).
11. Бабич А.В., Винников В.А. Экспериментальные исследования структурных изменений минеральных зерен пиритосодержащих руд в СВЧ полях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019; 6: 106-114. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114>.
Babich A.V., Vinnikov V.A. Experimental studies of structural changes in mineral grains of pyrite-containing ores in microwave fields. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019; 6: 106-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114>.
12. Киореску А.В. Механизмы воздействия микроволнового излучения на процессы выщелачивания минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015; 63: 335-339.
Kiorescu A.V. Mechanisms of influence of microwave radiation on leaching processes. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2015; 63: 335-339. (In Russ.).
13. Olubambi P.A. Influence of microwave on the bioleaching behaviour of low-grade complex sulphide ores. *Hydrometallurgy*. 2009; 95 (1-2): 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.043>.
14. Liu C., Liu H., Long J., et al. Interaction of dry and water-saturated uranium ore with microwave and enhanced extraction of uranium. *Minerals Engineering*. 2023; 196: 108047. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108047>.
15. Киореску А.В. Биовыщелачивание никеля, меди и кобальта из предварительно обработанной СВЧ-излучением руды. *Успехи современного естествознания*. 2019; 12: 51-56. <https://doi.org/10.17513/use.37268>.
Kiorescu A.V. Bioleaching of Nickel, Copper, and Cobalt from Microwave-Pretreated Ore. *Advances in Current Natural Sciences*. 2019; 12: 51-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37268>.
16. Charikinya E., Bradshaw S.M. An experimental study of the effect of microwave treatment on long term bioleaching of coarse, massive zinc sulphide ore particles. *Hydrometallurgy*. 2017; 173: 106-114. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.08.001>.
17. Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Маканов К.М. и др. Характерная температура минимальной энергоёмкости измельчения руд и минералов при нагреве СВЧ-волнами. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020; 9: 65-76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-65-76>.
Tazhibayev K.T., Sultanaliyeva R.M., Makanov K.M., et al. Characteristic temperature of minimum energy intensity of grinding ores and minerals heated by microwave waves. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 9: 65-76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-65-76>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Роман Сергеевич Вopiлин – аспирант ФГБУН
«Научно-исследовательский геотехнологический центр»
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(НИГТЦ 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
(НИГТЦ ДВО РАН), научный руководитель аспиранта,
г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Roman S. Vopilin –
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

Критерии авторства:

Р. С. Вopilin – сбор и анализ данных литературных источников, проведение экспериментальных исследований, определение параметров процесса, подготовка текста статьи, включая описательные методики, оформление рисунков, визуализация данных и корректность их анализа; В. А. Иодис – постановка целей и задач, проведение экспериментальных исследований, интерпретация результатов и их научное обоснование, рецензирование и редактирование текста статьи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.03.2026

Поступила после рецензирования: 13.05.2026

Принята к публикации: 26.05.2026

Contribution:

R. S. Vopilin – collection and analysis of data from literary sources, conducting experimental studies, determining process parameters, preparing the text of the article, including descriptive methods, designing figures, visualizing data and ensuring the correctness of their analysis; V. A. Iodis – setting goals and objectives, conducting experimental studies, interpreting the results and their scientific justification, reviewing and editing the text of the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 25.03.2026

Revised: 13.05.2026

Accepted: 26.05.2026