



Определение кинетических характеристик растворения борнита и халькопирита в азотной кислоте

Ю. Шкляев¹, О.А. Дизер^{2✉}, Т.Н. Луговичкая³, Д.И. Головкин⁴, Д.А. Рогожников⁵

¹⁻⁵Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель данного исследования заключается в определении кинетических характеристик процесса растворения в азотной кислоте сульфидных медьсодержащих минералов: халькопирита (CuFeS_2) и борнита (Cu_5FeS_4). Для описания кинетики процесса использовалась модель сжимающегося ядра. В качестве основного сырья для проведения исследований были использованы минералы халькопирит Воронцовского и борнит Карабашского месторождений. Растворы анализировали оптико-эмиссионным спектральным методом, кеки – волновым рентгенофлуоресцентным. Обработка результатов исследований осуществлялась с помощью пакета прикладных программ MS Excel. Проведены исследования по изучению влияния различных факторов (температуры, концентрации растворителя, крупности частиц и продолжительности процесса) на степень растворения минералов. Температурный диапазон варьировался от 35 до 95 °С, концентрация HNO_3 изменялась от 1 до 9 моль/дм³, размер частиц – от 0,1 до 0,056 мм, продолжительность – от 0 до 60 мин. Установлено, что увеличение температуры и концентрации кислоты значительно повышает степень растворения как халькопирита, так и борнита. Показано, что уменьшение размера частиц также способствует более эффективному растворению обоих минералов в азотной кислоте. Рассчитанные значения энергии активации составили 55 кДж/моль для халькопирита и 43 кДж/моль для борнита, соответственно, что характерно для кинетической области протекания процесса. Были определены порядки реакции по реагенту: 1,62 для халькопирита и 1,57 для борнита, а также по размеру частиц: -1,16 для халькопирита и -2,53 для борнита. Эти данные позволили вывести обобщенные уравнения кинетики растворения обоих минералов. Таким образом, на основании проведенных расчетов и анализа результатов было сделано предположение, что процесс растворения халькопирита и борнита в изучаемых условиях протекает в кинетическом режиме

Ключевые слова: медь, железо, халькопирит, борнит, растворение, азотная кислота, кинетические характеристики, энергия активации, кинетическое уравнение

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания Российской Федерации по Гранту № 075-03-2024-009/1 (FEUZ-2024-0010).

Для цитирования: Шкляев Ю., Дизер О.А., Луговичкая Т.Н., Головкин Д.И., Рогожников Д.А. Определение кинетических характеристик растворения борнита и халькопирита в азотной кислоте // iPolytechJournal. 2024. Т. 28. № 3. С. 576–584. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-576-584>. EDN: WTLVTK.

METALLURGY

Original article

Kinetic characteristics of bornite and chalcopyrite dissolution in nitric acid

Yurii Shklyaev¹, Oleg A. Dizer^{2✉}, Tatyana N. Lugovitskaya³, Dmitry I. Golovkin⁴, Denis A. Rogozhnikov⁵

¹⁻⁵Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia

Abstract. The kinetic characteristics of dissolution of copper-bearing sulfides – chalcopyrite (CuFeS_2) and bornite (Cu_5FeS_4) – in nitric acid were studied. The kinetics of the dissolution process was described using a compressible nucleus model. Chalcopyrite of the Vorontsovskoye deposit and bornite of the Karabash deposit were used as research objects. Solution and cake samples were analyzed by optical emission spectrometry and X-ray fluorescence analysis, respectively. The results obtained were processed in the MS Excel software package. The influence of various factors, including temperature, solvent concentration, particle size, and process duration on the dissolution degree of minerals was studied. The process parameters were varied as follows: temperature – from 35

to 95 °C; HNO₃ concentration – from 1 to 9 mol/dm³; particle size – from +0.1 to 0.056 mm; duration – from 0 to 60 min. It was established that an increase in temperature and acid concentration leads to a significant increase in the degree of dissolution of both chalcopyrite and bornite. A decrease in particle size also contributes to a more efficient dissolution of both minerals in nitric acid. The calculated activation energy values were 55 kJ/mol for chalcopyrite and 43 kJ/mol for bornite, which is characteristic of the kinetic region of the process. The reaction orders in terms of reactant were determined: 1.62 for chalcopyrite and 1.57 for bornite. In terms of particle size, these were -1.16 for chalcopyrite and -2.53 for bornite. On this basis, generalized equations of dissolution kinetics for both minerals were derived. The results obtained allow an assumption about the kinetic nature of dissolution of chalcopyrite and bornite under the studied conditions.

Keywords: copper, iron, chalcopyrite, bornite, dissolution, nitric acid, kinetic characteristics, activation energy, kinetic equation

Funding. The study was carried out with the financial support of the State Assignment of the Russian Federation under the Grant no. 075-03-2024-009/1 (FEUZ-2024-0010).

For citation: Shklyayev Yu., Dizer O.A., Lugovitskaya T.N., Golovkin D.I., Rogozhnikov D.A. Kinetic characteristics of bornite and chalcopyrite dissolution in nitric acid. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):576-584. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-576-584>. EDN: WTLVTK.

ВВЕДЕНИЕ

В современной эпохе промышленности существует разнообразие методов переработки медного сырья, причем наиболее распространенными и эффективными являются пирометаллургические методы. Эти методы обеспечивают высокую эффективность извлечения меди и высокое содержание меди в конечном продукте [1]. Однако они не лишены недостатков, таких как необходимость дополнительной переработки, высокий расход кокса, сложность обслуживания и высокие затраты [2].

В связи с этим с каждым днем гидрометаллургические технологии приобретают все большую популярность в области переработки медных руд. Среди современных гидрометаллургических методов особое внимание привлекают хлоридные [3, 4], сульфатные [5–9] и аммиачные процессы выщелачивания [10], а также биовыщелачивание [11–17] и автоклавное окисление [18–21].

Главными недостатками биовыщелачивания являются сложность поддержания жизнедеятельности применяемых микроорганизмов, необходимость создания больших отапливаемых помещений, значительная продолжительность процесса [22]. Основные трудности при реализации автоклавных процессов связаны с высокой энергоемкостью и большими капитальными вложениями.

Для повышения эффективности гидрометаллургических методов выщелачивания широко применяются технологии сверхтонкого измельчения, такие как технологии Albion и Activox [23]. Однако существуют сложности, связанные с капитальными затратами на

оборудование и высокими энергозатратами при получении мелкодисперсного материала.

В данной ситуации актуальна разработка нового эффективного метода переработки комплексных сульфидных медных руд. Один из перспективных подходов в этом направлении – азотнокислотное выщелачивание. Азотная кислота обладает сильными окислительными свойствами (окислительный потенциал 0,957 В). Она способна разлагать сульфидные минералы, переводя медь, железо, цинк и другие ценные компоненты в раствор. Достоинством этого процесса является возможность улавливания образующихся нитрозных газов с дальнейшей регенерацией азотной кислоты. Благодаря этому уменьшаются затраты на реагент [24].

Хотя некоторое количество работ [25, 26] посвящено изучению кинетики азотнокислотного растворения сульфидных медных руд, существует потребность в дальнейших исследованиях для более глубокого понимания процессов на примере природных минералов.

Цель данного исследования заключается в изучении определения закономерностей азотнокислотного растворения халькопирита и борнита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного сырья для проведения исследований были использованы минералы халькопирит Воронцовского и борнит Карабашского месторождений. Материалы для исследований были измельчены и просеяны на ситах для получения необходимой крупности частиц.

Исследования по азотнокислотному растворению сульфидных медных минералов

проводились с использованием установки, включающей реактор из боросиликатного стекла объемом 0,5 дм³ и термостат Huber Kiss K6. Перемешивание осуществляли при помощи верхнеприводной мешалки Eurostar 20 digital. Перед проведением эксперимента раствор нагревали до требуемой температуры, затем добавляли 10 г исходного материала. Через определенные промежутки времени в течение часа отбирали пробы. В конце эксперимента пульпу выщелачивания фильтровали с использованием вакуума для отделения раствора от твердого остатка. Растворы анализировали с использованием оптико-эмиссионного спектрометра EXPEC 6500. Кек сушили и анализировали на волнодисперсионном спектрометре ARL Advant'X 4200.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние температуры на степень растворения минералов было исследовано при следующих постоянных параметрах: концентрация азотной кислоты – 5 моль/дм³, Ж:Т = 20:1, размер частиц – 0,074 + 0,063 мм. На рис. 1 представлены зависимости степени растворения минералов от времени при различных температурах.

Из графиков, представленных на рис. 1, видно, что повышение температуры положительно влияет на процесс растворения халькопирита и борнита. Например, степень растворения CuFeS₂ увеличивается с 5 до 87%, а Cu₅FeS₄ – с 24 до 80% соответственно.

Влияние концентрации HNO₃ на растворение халькопирита и борнита оценивали при следующих параметрах: температура – 65 °С, Ж:Т = 20:1, размер частиц – 0,074 + 0,063 мм. На рис. 2 представлены зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различных концентрациях азотной кислоты.

Исходя из данных, представленных на рис. 2, можно отметить, что повышение концентрации HNO₃ оказывает положительное воздействие на процесс растворения халькопирита и борнита. Степень растворения CuFeS₂ увеличивается с 19 до 87%, а Cu₅FeS₄ – с 19 до 81% соответственно.

Для оценки влияния размера частиц на растворение CuFeS₂ и Cu₅FeS₄ использовались следующие условия: температура – 65 °С, Ж:Т = 20:1, концентрация HNO₃ – 5 моль/дм³. На рис. 3 представлены зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различной крупности частиц.

Уменьшение размера частиц оказывает положительное влияние на растворение халькопирита и борнита. При этом степень растворения халькопирита увеличивается с 42 до 52%, борнита – с 30 до 66%.

Для расчета кинетических характеристик растворения CuFeS₂ и Cu₅FeS₄ в азотной кислоте использовали модель сжимающегося ядра [27, 28]. Эта модель предполагает, что область реакции постепенно углубляется внутрь частицы, создавая позади себя инертный слой твердого вещества. В каждый момент времени существует ядро еще непрореагировавшего материала, размер которого непрерывно уменьшается.

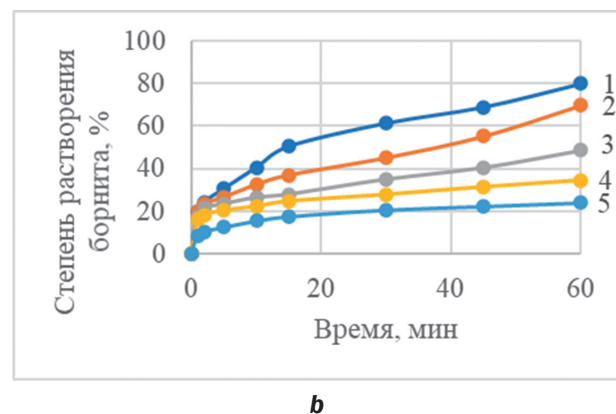
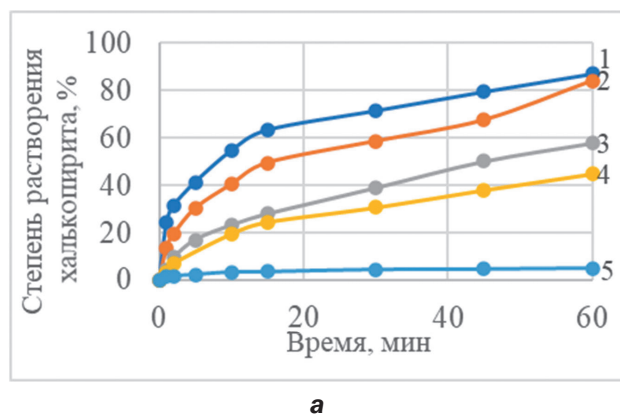


Рис. 1. Зависимости степени растворения минералов от продолжительности при разных температурах для халькопирита (а); для борнита (б): 1 – 95 °С; 2 – 80 °С; 3 – 65 °С; 4 – 50 °С; 5 – 35 °С

Fig. 1. Mineral dissolution degree vs time at different temperatures for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – 95 °С; 2 – 80 °С; 3 – 65 °С; 4 – 50 °С; 5 – 35 °С

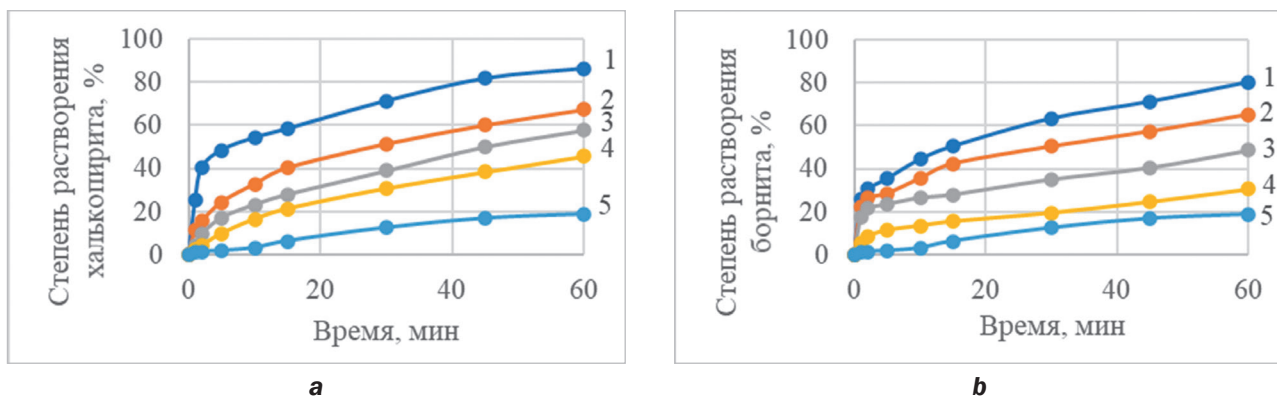


Рис. 2. Зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различных концентрациях азотной кислоты для халькопирита (а); для борнита (b): 1 – 9 моль/дм³; 2 – 7 моль/дм³; 3 – 5 моль/дм³; 4 – 3 моль/дм³; 5 – 1 моль/дм³
Fig. 2. Mineral dissolution degree vs time at different concentrations of nitric acid for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – 9 mol/dm³; 2 – 7 mol/dm³; 3 – 5 mol/dm³; 4 – 3 mol/dm³; 5 – 1 mol/dm³

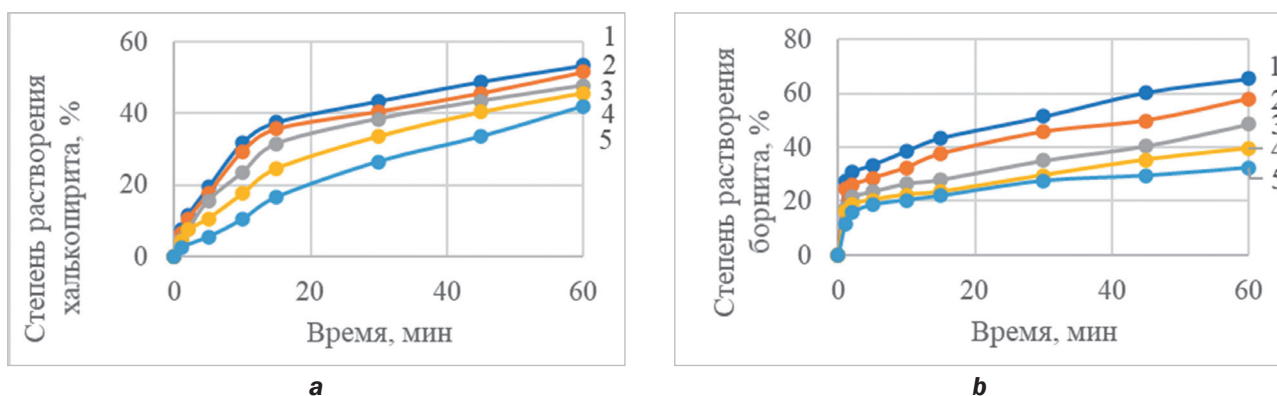


Рис. 3. Зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различной крупности халькопирита (а); для борнита (b): 1 – -0,056 мм; 2 – -0,063 + 0,056 мм; 3 – -0,074 + 0,063 мм; 4 – -0,1 + 0,074 мм; 5 – +0,1 мм
Fig. 3. Mineral dissolution degree vs time at different particle sizes for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – -0.056 mm; 2 – -0.063 + 0.056 mm; 3 – -0.074 + 0.063 mm; 4 – -0.1 + 0.074 mm; 5 – +0.1 mm

По результатам анализа значения коэффициента детерминации было установлено, что процесс растворения обоих минералов протекает в кинетическом режиме.

С использованием графического метода для обоих минералов были вычислены значения минимальной избыточной энергии, не-

обходимой для начала реакции. Расчет проводился на основе зависимости логарифма константы скорости (рис. 4) от обратной температуры (рис. 5). Путем определения тангенса угла наклона прямой были получены значения: для халькопирита – 55 кДж/моль и для борнита – 43 кДж/моль.

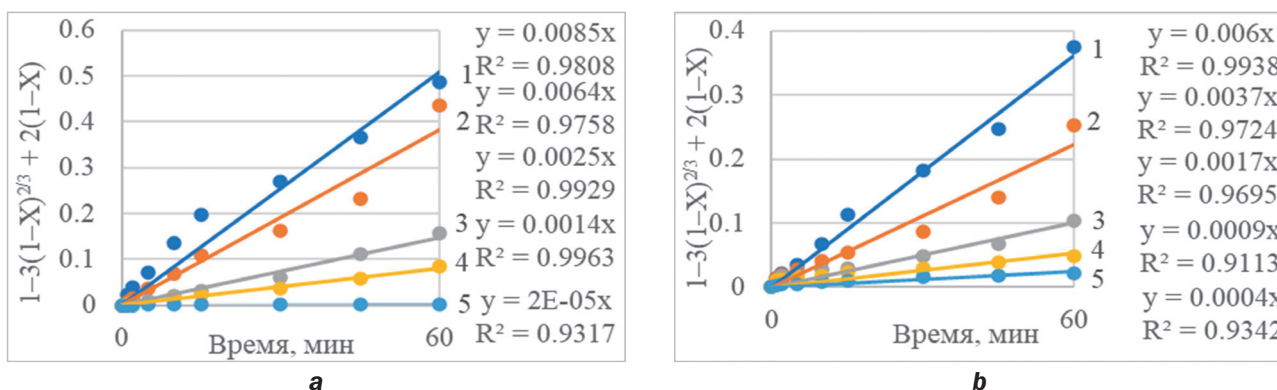
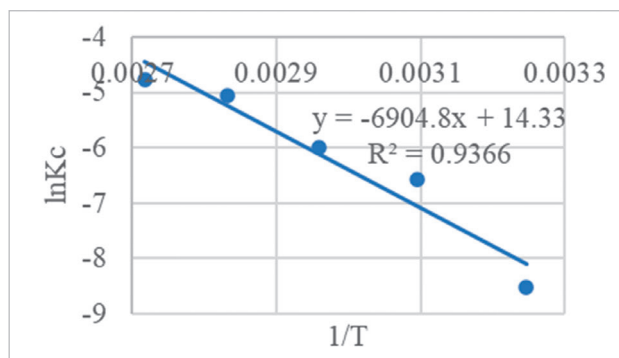
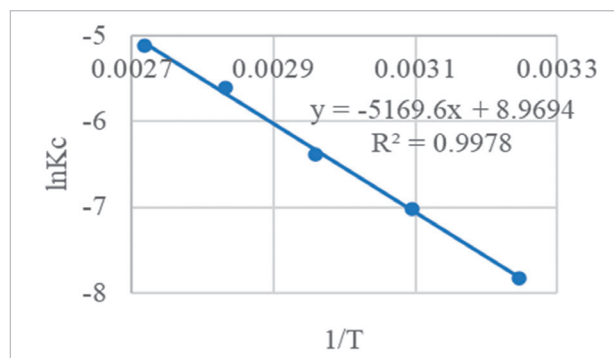


Рис. 4. Определение k_c для халькопирита (а); для борнита (b): 1 – 95°C; 2 – 80°C; 3 – 65°C; 4 – 50°C; 5 – 35°C
Fig. 4. k_c determination for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – 95°C; 2 – 80°C; 3 – 65°C; 4 – 50°C; 5 – 35°C



a



b

Рис. 5. Зависимость $\ln K_c$ от $1/T$ для халькопирита (a); для борнита (b)Fig. 5. $\ln K_c$ vs $1/T$ for chalcopirite (a); for bornite (b)

Аналогичным методом, используя графики зависимости логарифма константы скорости реакции от логарифма концентрации азотной кислоты и размера частиц, были определены эмпирические порядки по реагенту (1,62 для халькопирита и 1,57 для борнита) и размеру частиц (-1,16 для халькопирита и -2,53 для борнита).

Согласно результатам проведенных исследований, были выведены обобщенные кинетические уравнения для азотнокислотного растворения халькопирита, борнита.

Для CuFeS_2 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 2488,2 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,62} \cdot r^{-1,16} \cdot e^{\frac{-55410}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

Для Cu_5FeS_4 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 793,8 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,57} \cdot r^{-2,53} \cdot e^{\frac{-42980}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что концентрация азотной кислоты и температура оказывают наиболее благоприятное воздействие на процесс растворения халькопирита и борнита, в то время как уменьшение размеров частиц оказывает менее значительное влияние.

2. С применением модели сжимающегося ядра были определены значения минимальной избыточной энергии, необходимой для начала реакции растворения для халькопирита (CuFeS_2) – 55 кДж/моль и для борнита (Cu_5FeS_4) – 43 кДж/моль. Порядки реакций по реагенту для халькопирита и борнита составляют 1,62 и 1,57 соответственно. А по крупности порядки реакций для халькопирита и борнита равны -1,16 и -2,53.

3. Получены обобщенные уравнения, позволяющие на основании значений энергии активации, температуры, порядков по реагенту и крупности, концентрации азотной кислоты, размера частиц, продолжительности процесса спрогнозировать степень растворения обоих минералов.

Для CuFeS_2 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 2488,2 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,62} \cdot r^{-1,16} \cdot e^{\frac{-55410}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

Для Cu_5FeS_4 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 793,8 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,57} \cdot r^{-2,53} \cdot e^{\frac{-42980}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

4. На основании проведенных расчетов сделано предположение, что процесс растворения халькопирита и борнита при данных условиях протекает в кинетическом режиме.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Japel S., Schwager B., Ross M., Boehler R. Melting of copper and nickel at high pressure: the role of delectrons // Physical review letters. 2005. Vol. 95. Iss. 16. P. 167801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.167801>.
2. Khojiev S.T.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. Vol. 6. Iss. 2. P. 8094–8099.

3. Ma Yalong, Yang Yi, Fan Rong, Gao Xiyu, Zheng Lei, Chen Miao. Chalcopyrite leaching in ammonium chloride solutions under ambient conditions: insight into the dissolution mechanism by XANES, Raman spectroscopy and electrochemical studies // *Minerals Engineering*. 2021. Vol. 170. Iss. 15. P. 107063. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107063>.
4. Jara C., Harris R., Abbolt A., Jenkin G. Chemical dissolution of chalcopyrite concentrate in choline chloride ethylene glycol deep eutectic solven // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 65. <https://doi.org/10.3390/min12010065>.
5. Dutrizac J.E., Macdonald R.J.C., Ingraham T.R. The kinetics of dissolution of bornite sulfate solutions // *Metallurgical transactions*. 1970. Vol. 1. P. 225–231. <https://doi.org/10.1007/BF02819265>.
6. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Characterization of the solid leach residues from the iodine-assisted chalcopyrite leaching in ferric sulfate media // *Hydrometallurgy*. 2024. Vol. 226. P. 106302. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106302>.
7. Muravyov M., Panyushkina A. Comparison of sphalerite, djurleite, and chalcopyrite leaching by chemically and biologically generated ferric sulfate solutions // *Hydrometallurgy*. 2023. Vol. 219. P. 106067. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106067>.
8. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Iodine-assisted chalcopyrite leaching in ferric sulfate media: kinetic study under fully controlled redox potential and pH // *Hydrometallurgy*. 2022. Vol. 208. P. 105797. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105797>.
9. Булаев А.Г., Меламуд В.С., Бодуэн А.Я. Высокотемпературное выщелачивание меди и цинка из некондиционного концентрата с высоким содержанием мышьяк // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. № 12-1. С. 72–76. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>.
10. Hua Xiao-ming, Zheng Yong-fei, Xu Qian, Lu Xiong-gang. Interfacial reactions of chalcopyrite in ammonia–ammonium chloride solution // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018. Vol. 28. Iss. 3. P. 556–566. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64688-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64688-6).
11. Toledo A.G.R., Costa R.B., Delforno T.P., Arena F.A., Bevilacqua D. Exploring chalcopyrite (bio)leaching mechanisms under thermophilic conditions // *Minerals Engineering*. 2023. Vol. 204. P. 108417. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108417>.
12. Liu Mengfei, Zhu Jinglei, Zhang Chenyang, He Peng, Chen Daixiong, Zhong Guojian, et al. Effect of calcium lignosulfonate on surface modification and bioleaching of chalcopyrite // *Biochemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 207. P. 109329. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109329>.
13. Zhang Hao, Wei Dezhou, Liu Wengang, Hou Duanxu, Zhang Ruiyang. Effect of polyvinyl pyrrolidone on chalcopyrite bioleaching with *Acidithiobacillus ferrooxidans* // *Hydrometallurgy*. 2021. Vol. 205. № 12(1). P. 105753. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105753>.
14. Хайнасова Т.С. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды с применением стандартной и модифицированной сред 9K // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 12-1. С. 175–180. <https://doi.org/10.17513/use.37286>. EDN: BCAEVQ.
15. Хайнасова Т.С. Биовыщелачивание халькопирита из сульфидных медно-никелевых руд (обзор) // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S46. С. 247–264. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-46-247-264>. EDN: IGPDPK.
16. Елкина Ю.А., Мельникова Е.А., Меламуд В.С., Булаев А.Г. Биовыщелачивание теннантита и энаргита умеренно-термофильными ацидофильными микроорганизмами // *Микробиология*. 2020. Т. 89. № 4. С. 419–431. <https://doi.org/10.31857/S0026365620040059>. EDN: QIRGDH.
17. Елкина Ю.А., Меламуд В.С., Булаев А.Г. Биовыщелачивание медно-цинкового концентрата с высоким содержанием мышьяка // *Микробиология*. 2021. Т. 90. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.31857/S0026365620060038>. EDN: IBCOUH.
18. Bai Yunlong, Wang Wei, Xie Feng, Lu Diankun, Jiang Kaixi, Dreisinger D. In-situ electrochemical study of chalcopyrite pressure oxidation leaching from 110 °C to 150 °C under saturated vapor pressure // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15. Iss. 10. P. 104139. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104139>.
19. Turan M.D., Sari Z.A., Nizamoglu H. Pressure leaching of chalcopyrite with oxalic acid and hydrogen peroxide // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2021. Vol. 118. P. 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.021>.
20. McDonald R.G., Li Jian, Austin P.J. High temperature pressure oxidation of a low-grade nickel sulfide concentrate with control of the residue composition // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 249. <https://doi.org/10.3390/min10030249>.
21. Karimov K.A., Rogozhnikov D.A., Kuzas E.A., Shoppert A.A. Leaching kinetics of arsenic sulfide-containing materials by copper sulfate solution // *Metals*. 2020. Vol. 10. Iss.1. P. 7. <https://doi.org/10.3390/met10010007>.
22. Ghosh A.G., Pandey B.D. Bioleaching of low-grade granitic chalcopyrite ore by hyperthermophiles: elucidation of kinetics-mechanism // *Metallurgical Research Technology*. 2015. Vol. 112. Iss. 5. P. 506. <https://doi.org/10.1051/metal/2015031>.
23. Johnson G., Corrans I., Angove J. The Activox process for refractory gold ores // *Randol Gold Forum - Beaver Creek*. 1993. Vol. 93. P. 183–189.
24. Karimov K., Rogozhnikov D., Kuzas E., Dizer O., Golovkin D., Tretiak M. Deposition of arsenic from nitric acid leaching solutions of gold-arsenic sulphide concentrates // *Metals*. 2021. Vol. 11. Iss. 6. P. 889. <https://doi.org/10.3390/met11060889>.
25. Agacayak T., Aras A. Leaching of chalcopyrite concentrate (CuFeS₂) in nitric acid (HNO₃) solution // *Academic Journal of Science*. 2013. Vol. 2. Iss. 1. P. 61–65.

26. Alafara A.B., Kuranga I.A., Rafiu B.B., Folahan A.A. Quantitative leaching of a Nigerian chalcopryrite ore by nitric acid // Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. 2014. Vol. 7. Iss. 2. P. 115–121. <http://dx.doi.org/10.4314/bajopas.v7i2.20>.
27. Levenspiel O. Chemical reaction engineering. New York: Wiley, 1999. 688 p.
28. Rogozhnikov D., Karimov K., Shoppert A., Dizer O., Naboichenko S. Kinetics and mechanism of arsenopyrite leaching in nitric acid solutions in the presence of pyrite and Fe(III) ions // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 199. P. 105525. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105525>.

References

1. Japel S., Schwager B., Ross M., Boehler R. Melting of copper and nickel at high pressure: the role of delectrons. *Physical review letters*. 2005;95(16):167801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.167801>.
2. Khojiev S.T.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2019;6(2):8094-8099.
3. Ma Yalong, Yang Yi, Fan Rong, Gao Xiyu, Zheng Lei, Chen Miao. Chalcopryrite leaching in ammonium chloride solutions under ambient conditions: insight into the dissolution mechanism by XANES, Raman spectroscopy and electrochemical studies. *Minerals Engineering*. 2021;170(15):107063. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107063>.
4. Jara C., Harris R., Abbolt A., Jenkin G. Chemical dissolution of chalcopryrite concentrate in choline chloride ethylene glycol deep eutectic solven. *Minerals*. 2022;12(1):65. <https://doi.org/10.3390/min12010065>.
5. Dutrizac J.E., Macdonald R.J.C., Ingraham T.R. The kinetics of dissolution of bornite sulfate solutions. *Metallurgical transactions*. 1970;1:225-231. <https://doi.org/10.1007/BF02819265>.
6. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Characterization of the solid leach residues from the iodine-assisted chalcopryrite leaching in ferric sulfate media. *Hydrometallurgy*. 2024;226:106302. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106302>.
7. Muravyov M., Panyushkina A. Comparison of sphalerite, djurleite, and chalcopryrite leaching by chemically and biologically generated ferric sulfate solutions. *Hydrometallurgy*. 2023;219:106067. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106067>.
8. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Iodine-assisted chalcopryrite leaching in ferric sulfate media: kinetic study under fully controlled redox potential and pH. *Hydrometallurgy*. 2022;208:105797. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105797>.
9. Bulaev A.G., Melamud V.S., Boduen A.Ya. High-temperature biox of copper and zinc from non-standard concentrate with high content of arsenic. *International Research Journal*. 2018;12-1:72-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>.
10. Hua Xiao-ming, Zheng Yong-fei, Xu Qian, Lu Xiong-gang. Interfacial reactions of chalcopryrite in ammonia-ammonium chloride solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018;28(3):556-566. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64688-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64688-6).
11. Toledo A.G.R., Costa R.B., Delforno T.P., Arena F.A., Bevilaqua D. Exploring chalcopryrite (bio)leaching mechanisms under thermophilic conditions. *Minerals Engineering*. 2023;204:108417. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108417>.
12. Liu Mengfei, Zhu Jinglei, Zhang Chenyang, He Peng, Chen Daixiong, Zhong Guojian, et al. Effect of calcium lignosulfonate on surface modification and bioleaching of chalcopryrite. *Biochemical Engineering Journal*. 2024;207:109329. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109329>.
13. Zhang Hao, Wei Dezhou, Liu Wengang, Hou Duanxu, Zhang Ruiyang. Effect of polyvinyl pyrrolidone on chalcopryrite bioleaching with Acidithiobacillus ferrooxidans. *Hydrometallurgy*. 2021;205(12-1):105753. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105753>.
14. Khaynasova T.S. Bioleaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore using the standard and modified 9k media. *Advances in current natural sciences*. 2019;12-1:175-180. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37286>. EDN: BCAEVQ.
15. Khainasova T.S. Bioleaching of chalcopryrite from sulphide copper-nickel ore (review). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;S46:247-264. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-46-247-264>. EDN: IGPPDK.
16. Elkina Yu.A., Melnikova E.A., Melamud V.S., Bulaev A.G. Bioleaching of enargite and tennantite by moderately thermophilic acidophilic microorganisms. *Microbiology*. 2020;89(4):419-431. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0026365620040059>. EDN: QIRGDH.
17. Elkina Yu.A., Melamud V.S., Bulaev A.G. Bioleaching of a copper-zinc concentrate with high arsenic content. *Microbiology*. 2021;90(1):90-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0026365620060038>. EDN: IBCOUH.
18. Bai Yunlong, Wang Wei, Xie Feng, Lu Diankun, Jiang Kaixi, Dreisinger D. In-situ electrochemical study of chalcopryrite pressure oxidation leaching from 110 °C to 150 °C under saturated vapor pressure. *Arabian Journal of Chemistry*. 2022;15(10):104139. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104139>.
19. Turan M.D., Sari Z.A., Nizamoglu H. Pressure leaching of chalcopryrite with oxalic acid and hydrogen peroxide. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2021;118:112-120. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.021>.
20. McDonald R.G., Li Jian, Austin P.J. High temperature pressure oxidation of a low-grade nickel sulfide concentrate with control of the residue composition. *Minerals*. 2020;10(3):249. <https://doi.org/10.3390/min10030249>.
21. Karimov K.A., Rogozhnikov D.A., Kuzas E.A., Shoppert A.A. Leaching kinetics of arsenic sulfide-containing materials by copper sulfate solution. *Metals*. 2020;10(1):7. <https://doi.org/10.3390/met10010007>.
22. Ghosh A.G., Pandey B.D. Bioleaching of low-grade granitic chalcopryrite ore by hyperthermophiles: elucidation of kinetics-mechanism. *Metallurgical Research Technology*. 2015;112(5):506. <https://doi.org/10.1051/metal/2015031>.

23. Johnson G., Corrans I., Angove J. The Activox process for refractory gold ores. In: *Randol Gold Forum - Beaver Creek*. 1993;93:183-189.
24. Karimov K., Rogozhnikov D., Kuzas E., Dizer O., Golovkin D., Tretiak M. Deposition of arsenic from nitric acid leaching solutions of gold-arsenic sulphide concentrates. *Metals*. 2021;11(6):889. <https://doi.org/10.3390/met11060889>.
25. Agacayak T., Aras A. Leaching of chalcopyrite concentrate (CuFeS₂) in nitric acid (HNO₃) solution. *Academic Journal of Science*. 2013;2(1):61-65.
26. Alafara A.B., Kuranga I.A., Rafiu B.B., Folahan A.A. Quantitative leaching of a Nigerian chalcopyrite ore by nitric acid. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*. 2014;7(2):115-121. <http://dx.doi.org/10.4314/bajopas.v7i2.20>.
27. Levenspiel O. *Chemical reaction engineering*. New York: Wiley; 1999, 688 p.
28. Rogozhnikov D., Karimov K., Shoppert A., Dizer O., Naboichenko S. Kinetics and mechanism of arsenopyrite leaching in nitric acid solutions in the presence of pyrite and Fe(III) ions. *Hydrometallurgy*. 2021;199:105525. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105525>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкляев Юрий,

инженер – исследователь,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
iushklyayev@urfu.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4220-4330>

Дизер Олег Анатольевич,

к.т.н.,
старший научный сотрудник,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
✉ oleg.dizer@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Луговицкая Татьяна Николаевна,

к.т.н.,
старший научный сотрудник,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
t.n.lugovitskaia@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Головкин Дмитрий Игоревич

младший научный сотрудник,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
dmitry.golovkin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6308-4086>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yurii Shklyayev,

Research Engineer,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
iushklyayev@urfu.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4220-4330>

Oleg A. Dizer,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
✉ oleg.dizer@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Tatyana N. Lugovitskaya,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
t.n.lugovitskaia@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Dmitry I. Golovkin,

Junior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
dmitry.golovkin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6308-4086>

Рогожников Денис Александрович,

Д.Т.Н., доцент,
заведующий лабораторией,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
darogozhnikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5940-040X>

Denis A. Rogozhnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Laboratory,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia,
darogozhnikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5940-040X>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.03.2024 г.; одобре-
на после рецензирования 30.04.2024 г.; принята к
публикации 05.07.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 11.03.2024; approved
after reviewing 30.04.2024; accepted for publication
05.07.2024.