

УДК 546.74:66.081

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-37-43>

Научная статья

Research article



Оценка перспективности переработки окисленных никелевых руд с использованием СВЧ-энергии

С.Э. Польшгалов, В.Г. Лобанов, Д.С. Седельникова, О.Б. Колмачихина, О.Ю. Маковская

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

✉ Сергей Эдуардович Польшгалов (sergey.polygalov@urfu.ru)

Аннотация: Урал обладает запасами никеля на уровне 1,5 млн т. Месторождения находятся в промышленно развитом регионе — на территории Челябинской, Свердловской и Оренбургской областей. Однако в настоящее время их не разрабатывают, и металлический никель на Урале не производят, так как металлургические предприятия полностью остановлены. Причиной является то, что запасы никеля представлены окисленными никелевыми рудами (ОНР), которые являются сложным сырьем с низким содержанием никеля и кобальта, переработка которого по существующим технологиям нерентабельна. Осложняет задачу и то, что на сегодняшний день не существует метода обогащения ОНР с получением концентрата, поэтому все технологии предусматривают переработку всей массы руды, что ведет к значительным расходам на реагенты и энергетическим затратам. В то же время не прекращается поиск новых технологических подходов, ориентированных на применение альтернативных вариантов извлечения никеля и кобальта из ОНР уральских месторождений. Одним из подобных методов является применение СВЧ-энергии для вскрытия никелевых минералов и интенсификации перевода в раствор никеля и кобальта. В настоящей работе оценено влияние воздействия СВЧ-энергии на извлечение никеля из окисленных никелевых руд Уральского региона. Приводятся данные по сравнению показателей классического серно-кислотного выщелачивания и процесса с наложением СВЧ-энергии. Выполнен комплекс тестовых исследований, цель которых — оценить перспективность применения СВЧ-энергии для переработки ОНР. Сравнение технологических параметров обоих подходов выявило преимущество атмосферного серно-кислотного выщелачивания ОНР с наложением СВЧ-энергии, в ходе которого было достигнуто извлечение никеля в раствор до 95 % за небольшой промежуток времени. На основании полученных результатов данное направление выбрано как наиболее перспективное для практической реализации.

Ключевые слова: СВЧ-энергия, окисленные никелевые руды, выщелачивание, серная кислота, никель.

Для цитирования: Польшгалов С.Э., Лобанов В.Г., Седельникова Д.С., Колмачихина О.Б., Маковская О.Ю. Оценка перспективности переработки окисленных никелевых руд с использованием СВЧ-энергии. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(3):37–43. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-37-43>

Assessment of the prospects for processing oxidized nickel ores using microwave energy

S.E. Polygalov, V.G. Lobanov, D.S. Sedelnikova, O.B. Kolmachikhina, O.Yu. Makovskaya

Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., Ekaterinburg 620002, Russia

✉ Sergei E. Polygalov (sergey.polygalov@urfu.ru)

Abstract: The Ural region holds an estimated 1.5 million tons of nickel reserves, located in the industrially developed Chelyabinsk, Sverdlovsk, and Orenburg regions. At present, however, these deposits are not being exploited, and metallic nickel is not produced in the Urals, as metallurgical facilities have been completely shut down. The reserves are represented by oxidized nickel ores (ONO) — a complex raw material with low nickel and cobalt contents, whose processing by existing technologies is economically unfeasible. The challenge is compounded by

the absence of a beneficiation method for ONO that yields a concentrate; therefore, all current technologies require processing the entire ore mass, which results in high reagent consumption and substantial energy costs. Research is ongoing to develop new technological approaches, including alternative methods for extracting nickel and cobalt from ONO in the Ural deposits. One promising option is the use of microwave (MW) energy to unlock nickel-bearing minerals and accelerate the dissolution of nickel and cobalt. This study evaluates the effect of microwave energy on nickel recovery from oxidized nickel ores of the Ural region. Comparative data are presented for conventional sulfuric acid leaching and for the process with microwave energy applied. A series of test studies was carried out to assess the feasibility of using microwave energy for ONO processing. The comparison of technological parameters demonstrated the advantage of atmospheric sulfuric acid leaching with microwave energy, which achieved nickel recovery of up to 95 % in a relatively short time. These results identify this approach as the most promising for practical implementation.

Keywords: microwave energy, oxidized nickel ores, leaching, sulfuric acid, nickel.

For citation: Polygalov S.E., Lobanov V.G., Sedelnikova D.S., Kolmachikhina O.B., Makovskaya O.Yu. Assessment of the prospects for processing oxidized nickel ores using microwave energy. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(3):37–43.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-37-43>

Введение

В мировой и отечественной практике никель извлекают из сульфидных и окисленных руд. Сульфидные руды подвергают флотационному обогащению, флотоконцентрат перерабатывают пирометаллургическим способом [1]. В окисленных (латеритных) рудах сосредоточено 60–70 % мировых запасов никеля. Эти руды не поддаются обогащению традиционными методами, а извлечение никеля из исходной руды сопряжено с повышенными удельными затратами. Поэтому поиск рациональных технологий переработки окисленных никелевых руд (ОНР) остается чрезвычайно актуальным [2–4]. За рубежом переработка латеритных руд ведется, как правило, гидрометаллургическими или комбинированными методами [5–8].

Реализованные на практике гидрометаллургические технологии переработки ОНР основаны на процессах прямого выщелачивания никеля и кобальта раствором серной кислоты в двух вариантах:

— обработку сырья растворами серной кислоты проводят в режиме кучного выщелачивания (КВ) [9–12];

— выщелачивание осуществляют в автоклавных условиях (НРАЛ) [13; 14].

В некоторых вариантах кучное выщелачивание применяют в сочетании с автоклавным, что может снизить удельные затраты. Автоклавному выщелачиванию в растворах КВ подвергается исходная руда, а кучному выщелачиванию — кек автоклавной стадии.

Основные проблемы гидрометаллургической технологии переработки ОНР Уральского региона вызваны малым содержанием ценных компонентов (никеля и кобальта). Особенности фазового состава руд являются причиной высокого удель-

ного расхода реагентов, низкого извлечения целевых металлов и образования большого количества твердых отходов, которые необходимо складировать. Все эти факторы делают предлагаемые традиционные гидрометаллургические технологии нерентабельными и не позволяют адаптировать технологические схемы, применяемые за рубежом, к отечественным рудам.

Известно, что основная масса никеля в составе ОНР изоморфно замещает железо в труднорастворимых силикатах [14]. Для интенсификации гетерофазных превращений используют повышенные температуры, давление и интенсивное перемешивание.

Наибольшие перспективы в ускорении гидрометаллургических взаимодействий при оптимальных реагентных режимах в системе жидкое—твердое связаны с интенсификацией массообмена. Для ускорения гетерофазных процессов предлагаются разнообразные приемы, в том числе воздействие на реакционную систему колебаний различной частоты, включая звуковые диапазоны, в том числе ультразвук, ток промышленной частоты, высокие и сверхвысокие частоты.

СВЧ-энергия широко используется в различных сферах промышленности — нефтехимии, сельском хозяйстве, пищевой отрасли, сушке древесины, медицине и многих других. При этом указанное воздействие направлено исключительно с целью ускоренного нагрева того или иного материала. Только в нефтехимии и каталитической химии предусматривается использование СВЧ-потоков для интенсификации массообменных процессов.

Цель настоящей работы — оценка возможности интенсификации кислотного выщелачивания

никеля из окисленной руды путем воздействия на реакционную массу СВЧ-энергии и сравнение полученных результатов с показателями выщелачивания никеля традиционными методами.

Методы исследования и полученные результаты

Объектом исследований служила частная проба окисленной никелевой руды Уральского региона. Ее усреднили и отобрали лабораторную пробу, которую измельчили до крупности менее 0,074 мм. По результатам фазового анализа установлено, что основными минералами представленной руды являются гидрогетит ($\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), кремнезем (SiO_2), силикат никеля ($\text{NiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$). Помимо указанных основных фаз в пробах присутствуют глинозем (Al_2O_3), гидроксиды марганца, соединения кальция и др. Глинозем и кремнезем составляют основу глинообразующих минералов. По результатам химического анализа в руде содержится, мас. %: Ni — 0,92, Co — 0,064 и Fe — 39,32.

Для проведения исследований по обработке ОНР СВЧ-излучением была смонтирована лабораторная установка на базе доступной бытовой СВЧ-печи инверторного типа, которая позволяет выдавать установленную мощность СВЧ-энергии постоянно на всем протяжении ее работы. Это дает возможность более корректно оценивать удельный расход энергии и минимизировать перегрев пульпы.

Смесь ОНР с кислым раствором помещали в термостойкий лабораторный стакан, который устанавливали внутри СВЧ-печи непосредственно над волноводом, для чего печь располагали вертикально. Для оценки влияния СВЧ-излучения необходимо было создать условия, чтобы весь поток СВЧ-энергии, излучаемой магнетроном, был направлен на реакционную массу. Стакан оборачивали экранирующим кожухом из алюминиевой фольги. Указанные методические особенности позволили корректно оценить удельный расход энергии, оптимальную толщину слоя обрабатываемого материала (т.е. глубину проникновения СВЧ-энергии) и итоговую эффективность данного приема.

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

В экспериментах использовали достаточно концентрированные растворы серной кислоты (от 80 г/дм³), которые нагревались за счет интенсивно-

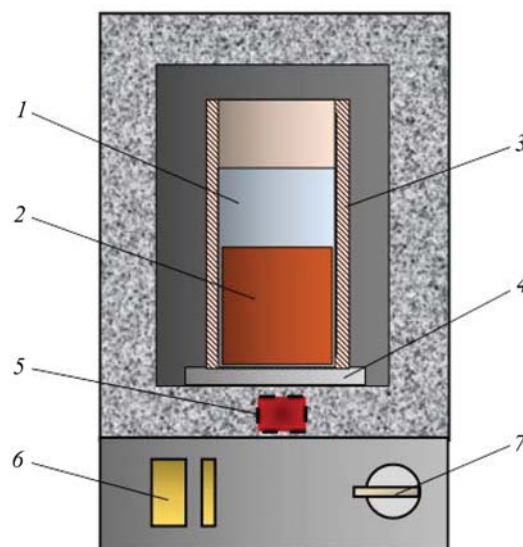


Рис. 1. Схема лабораторной установки

1 – реакционный стакан, 2 – пульпа, 3 – экранирующий кожух, 4 – подставка под реакционный стакан из СВЧ-прозрачного материала, 5 – магнетрон, 6 – датчик времени, 7 – регулятор управления

Fig. 1. Schematic of the laboratory setup

1 – reaction beaker, 2 – pulp, 3 – aluminum foil shield, 4 – support for the reaction beaker made of microwave-transparent material, 5 – magnetron, 6 – timer, 7 – power controller

го воздействия СВЧ-излучения. С целью защиты магнетрона от термического и химического воздействий реакционной массы на выходное окно волновода магнетрона накладывали дополнительный экран из радиопрозрачного материала — слюды и асбеста.

На первом этапе исследований для изучения влияния СВЧ-энергии на скорость выщелачивания никеля провели сравнительные опыты при одних и тех же условиях: Ж : Т = 5 : 1, интенсивность перемешивания 400 об/мин, температура не более 75 °С, концентрация серной кислоты 200 г/см³. Параллельно навески ОНР одинаковой массы выщелачивали в лабораторном стакане на нагревательной платформе и в установке с наложением СВЧ-энергии. СВЧ-активация протекала с выходной мощностью излучения 180 Вт. Продолжительность экспериментов в обоих случаях составляла 20 мин.

Через определенные промежутки времени отбирали пробы продуктивного раствора и анализировали на содержание никеля методом атомно-абсорбционного анализа на аппарате ANALYTIK JENA (Германия). По полученным результатам оценивали извлечение никеля в раствор (рис. 2).

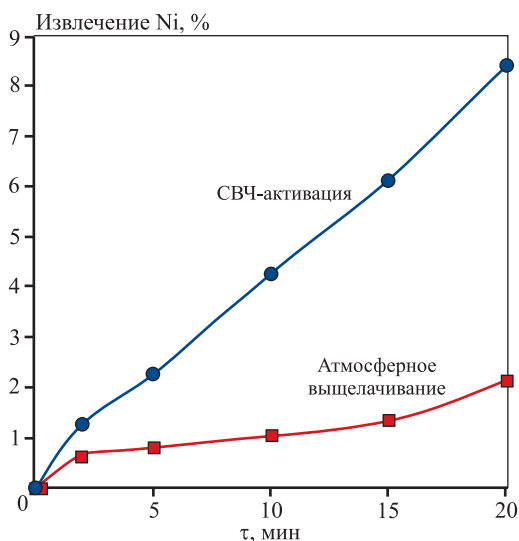


Рис. 2. Сравнение динамики выщелачивания никеля из ОНР

Fig. 2. Nickel recovery as a function of time under microwave-assisted and atmospheric leaching of ONO

Как и предполагалось, воздействие СВЧ-энергии существенно интенсифицирует перевод никеля в раствор по сравнению с традиционным высокотемпературным выщелачиванием. Скорость перехода никеля в раствор с применением СВЧ-активации возрастает приблизительно в 4 раза. Оценка предельного извлечения никеля в данной серии экспериментов не проводилась, но выявленная закономерность дает основание утверждать, что при СВЧ-активации конечный результат будет достигнут значительно быстрее.

Для практической реализации обсуждаемого способа и выбора конструктивных особенностей реактора представляет интерес оценить глубину проникновения СВЧ-потока в гетерофазную систему — пульпу, состоящую из раствора серной кислоты и измельченной руды в соотношении Ж : Т = 1 : 1. В реакционный сосуд загружали пульпу разного объема, что позволяло варьировать высоту уровня материала в стакане. На реакционный сосуд устанавливали стакан, в который заливали определенный объем дистиллированной воды. При включенной СВЧ-печи степень нагрева воды позволяла оценить долю СВЧ-энергии, не поглощенную пульпой. Плотность пульпы с указанным Ж : Т = 1 : 1 позволила минимизировать отстаивание твердого в течение опыта, что позволило корректно оценить глубину проникновения потока СВЧ-энергии через реакционную массу.

Для расчета поглощенной энергии использовали разницу температур среды до и после опыта.

Энергетические расчеты проводили с использованием уравнения

$$E = \frac{mC\Delta t}{\tau},$$

где E — мощность энергии, Вт/с; m — масса воды, г; $C = 4,18$ Дж/г — теплоемкость воды; Δt — разница температур, °С; τ — время, с.

Количество СВЧ-энергии, потребленной реакционной массой при разной толщине ее слоя представлено в таблице.

Полученные результаты показывают, что для весьма плотной пульпы поток СВЧ-энергии полностью поглощается при толщине реакционной массы 4–6 см. Несомненно, что при иных значениях мощности СВЧ-потока, плотности пульпы, а также при ее перемешивании этот параметр будет отличаться. Глубину проникновения СВЧ-энергии в реакционную массу, в которой происходит нагрев и интенсифицируется химическое превращение, принято называть СВЧ эффективная глубина или толщина. Именно в такой зоне можно ожидать нагрева, возникновения скин-эффекта и интенсивного растворения целевых компонентов.

На следующем этапе определяли скорость выщелачивания никеля при различном удельном расходе серной кислоты. Поскольку дополнительной целью данного эксперимента являлась оценка предельно достигаемого результата, опыты проводили при максимальной мощности магнетрона (900 Вт) и заведомо избыточном расходе кислоты.

Выщелачивающий раствор готовили добавлением требуемой массы кислоты в воду и разбавлением до одинакового объема. Масса навесок руды составляла 30 г, объем раствора — 60 мл. При указанной мощности энергетического воздействия реакционная масса быстро упаривается с получением плотного спека, и это принципиально меняет характер протекающих процессов. Во избе-

Количество СВЧ-энергии, поглощенной реакционной массой при разной высоте слоя пульпы

Microwave energy absorbed by the reaction mass at different pulp layer heights

Высота слоя пульпы, мм	Поглощенная энергия, Дж	Потери энергии, %
10	253,6	71,8
20	612,3	32,0
40	891,4	1,0
60	895,1	0,5

жание указанного явления длительность опыта составляла 4 мин. Контроль температуры реакционной массы в ходе опыта при СВЧ-активации по понятным причинам невозможен. Измерение этого параметра сразу после опытов показывает, что в стационарных условиях температура быстро достигает 95–100 °С.

В условиях ожидаемой высокой скорости взаимодействия минеральных соединений никеля и серной кислоты важнейшим фактором является ее концентрация в выщелачивающем растворе. С целью корректного сравнения результатов опытов при одинаковом объеме или эффективной толщине реакционной массы 4 см и при различной концентрации кислоты удельный расход реагента варьировался от 0,4 до 2,0 г на 1 г никелевой руды.

Навески окисленной никелевой руды перемешивали с раствором серной кислоты и подвергали воздействию СВЧ-энергии в течение заданного времени, например 1 мин, после чего пульпу извлекали из СВЧ-печи, разбавляли водой, фильтровали и в полученном фильтрате анализировали концентрации никеля и оставшейся серной кислоты. При том же расходе H_2SO_4 проводили выщелачивание в течение иной длительности. Другими словами, каждая точка на кривых рис. 3 и 4 — результаты отдельного опыта. Для сравнения при расходе серной кислоты 2 г/г руды проводили опыты с нагревом пульпы до 95 °С без СВЧ-активации. По результатам опытов рассчитывали извлечение

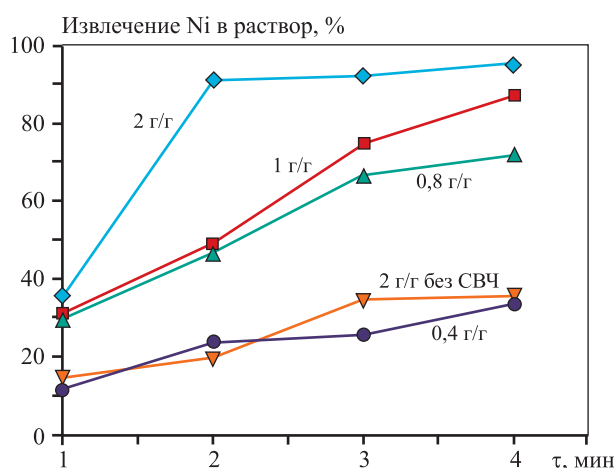


Рис. 3. Зависимость извлечения Ni в раствор при выщелачивании с наложением СВЧ-энергии при различном расходе серной кислоты (г/г руды)

Fig. 3. Dependence of nickel recovery on sulfuric acid consumption under microwave-assisted leaching of ONO (g/g ore)

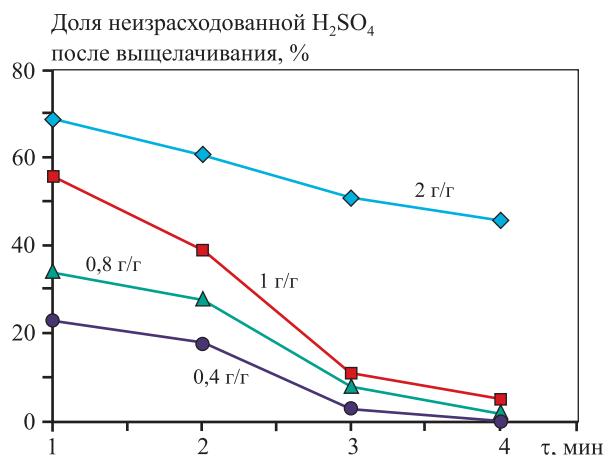


Рис. 4. Зависимость расхода серной кислоты при СВЧ-выщелачивания ОНР (г/г руды)

Fig. 4. Dependence of sulfuric acid consumption on time under microwave-assisted leaching of ONO (g/g ore)

никеля в раствор и долю серной кислоты, израсходованной на целевой процесс.

Полученные результаты свидетельствуют, что при избытке (равно — при высокой концентрации) серной кислоты скорость выщелачивания при воздействии СВЧ-энергии по сравнению с традиционными методами многократно увеличивается.

Выполненные эксперименты не имели целью оценить расходные коэффициенты и дать экономическую оценку обсуждаемого подхода к переработке минерального сырья, но полученные результаты доказывают что при определенных условиях близкое к 100 % извлечение никеля может быть достигнуто за весьма короткое время. При организации противоточного выщелачивания, широко применяемого в гидрометаллургии, подобный способ позволяет достичь требуемого извлечения целевых металлов с высокой скоростью. В целом усматривается перспективность применения СВЧ-энергии в повышении эффективности переработки металлургического сырья.

Изучение особенностей выщелачивания окисленной никелевой руды при СВЧ-активации с противотоком жидкой и твердой фаз является направлением дальнейших исследований

Выводы

1. Предложена оригинальная методика исследований процессов выщелачивания металлов из минерального сырья с использованием СВЧ-энергии.
2. Установлено, что эффективная глубина проникновения потока СВЧ-энергии через плотную

гетерофазную систему «измельченная руда — выщелачивающий раствор» при $J : T = 1 : 1$ не превышает 40 мм.

3. Проведение атмосферного серно-кислотного выщелачивания ОНР с наложением СВЧ-энергии позволяет многократно ускорить данный процесс, при этом максимально достигаемое извлечение никеля в раствор достигает 95 %.

Список литературы/References

1. Peiyu Zhang, Qiang Guo, Guangye Wei, Long Meng, Linxin Han, Jingkui Qu, Tao Qi. Extraction of metals from saprolitic laterite ore through pressure hydrochloric-acid selective leaching. *Hydrometallurgy*. 2015; (157):149–158. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.007>
2. Fatahi Mohammadreza, Noaparast Mohammad, Shafaei Seyyed Ziaeddin. Nickel extraction from low grade laterite by agitation leaching at atmospheric pressure. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014;4:543–548. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.05.019>
3. Jian-ming Gao, Mei Zhang, Min Guo. Innovative methodology for comprehensive utilization of saprolite laterite ore: Recovery of metal-doped nickel ferrite and magnesium hydroxide. *Hydrometallurgy*. 2015;(158):27–34. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.027>
4. Pickles C.A. Microwave heating behavior of nickeliferrous limonitic laterite ores. *Minerals Engineering*. 2004;6: 775–784. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.007>
5. Reid J., Barnett S. Nickel laterite hydrometallurgical processing update. In: *Nickel-Cobalt-8. Technical Sessions Proceedings «Alta Metallurgical Services»*. Perth, W. Australia, 2002. 27 p.
6. Berezowsky R.M. Laterite: new life of limonite. *Minerals Industry International*. 1997;1034:46–55.
7. Urbain D., Dutierque J. P., Palanque Ph., Rey P. Economic comparison between the sulphuric acid leach process and other processes for oxidized nickel ores. In: *Proceedings-nickel metallurgy. Vol. I: Extraction and refining of nickel*. 1986. P. 578–596.
8. Motteram G., Ryan M., Berezowsky R.M., Raudsepp R., Murrin M. Nickel-Cobalt Project: Project Development Overview. In: *Proc. of Nickel-Cobalt Pressure Leaching and Hydrometallurgy Forum* (May 13-14, 1996), Perth, Australia: Alta Metallurgical Services, 1996.
9. Аленичев В.М., Уманский А.Б., Ключников А.М. Физико-химические особенности процесса кучного выщелачивания окисленных никелевых руд Урала с использованием растворов серной кислоты. *Вестник Воронежского университета*. 2013;(2):9–14. Alenichev V.M., Umansky A.B., Klyushnikov A.M. Physicochemical features of the process of heap leaching of oxidized nickel ores of the Urals using sulfuric acid solutions. *Vestnik Voronezhskogo universiteta*. 2013;(2): 9–14.
10. Уманский А.Б., Ключников А.М. Гидрометаллургическая технология переработки отвалов серпентинита с выделением никелевого концентрата. В сб.: *Труды международного конгресса «Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов»*. 2012.
11. McDonald R.G., Whittington B.I. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part I. Sulphuric acid technologies. *Hydrometallurgy*. 2008;(1-4):35–55. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.11.009>
12. Аленичев В.М., Уманский А.Б., Ключников А.М. Разработка технологии кучного выщелачивания окисленных никелевых руд Уральских месторождений. *Известия Томского политехнического университета*. 2013;(3):124–128. Alenichev V.M., Umansky A.B., Klyushnikov A.M. Development of heap leaching technology for oxidized nickel ores of the Ural deposits. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013;(3):124–128.
13. Набойченко С.С., Ни Л.П., Шнеерсон Я.М., Чугаев Л.В. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2002. 940 с.
14. Колмачихина О.Б. Комбинированная технология переработки окисленных никелевых руд (на примере Серовского месторождения): Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Екатеринбург: УрФУ, 2018.

Информация об авторах

Сергей Эдуардович Полыгалов — ст. преподаватель кафедры металлургии цветных металлов (МЦМ), Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

E-mail: sergey.polygalov@urfu.ru

Владимир Геннадьевич Лобанов — к.т.н., доцент кафедры МЦМ, УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

E-mail: lobanov-vl@yandex.ru

Дарья Сергеевна Седельникова — студент кафедры МЦМ, УрФУ.

E-mail: lev.sokolov@urfu.ru

Ольга Борисовна Колмачихина — к.т.н., доцент кафедры МЦМ, УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0002-7879-8791>

E-mail: o.b.kolmachikhina@urfu.ru

Ольга Юрьевна Маковская — к.т.н., доцент кафедры МЦМ, УрФУ.

E-mail: o.i.makovskaia@urfu.ru

Information about the authors

Sergei E. Polygalov — Senior Lecturer at the Department of non-ferrous metallurgy (NFM), Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

E-mail: sergey.polygalov@urfu.ru

Vladimir G. Lobanov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of NFM, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

E-mail: lobanov-vl@yandex.ru

Dar'ya S. Sedelnikova — Student of the Department of NFM, UrFU.

E-mail: Daria.Sedelnikova@urfu.me

Ol'ga B. Kolmachikhina — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of NFM, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0002-7879-8791>

E-mail: o.b.kolmachikhina@urfu.ru

Ol'ga Yu. Makovskaya — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of NFM, UrFU.

E-mail: o.i.makovskaia@urfu.ru

Вклад авторов

С.Э. Полыгалов — формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

В.Г. Лобанов — научное руководство, корректировка текста и выводов.

Д.С. Седельникова — подготовка и проведение экспериментов.

О.Б. Колмачихина — осуществление расчетов, подготовка текста статьи.

О.Ю. Маковская — проведение расчетов, анализ результатов исследований.

Contribution of the authors

S.E. Polygalov — development of the main concept, definition of research objectives and tasks, preparation of the manuscript, formulation of conclusions.

V.G. Lobanov — scientific supervision, revision of the manuscript and conclusions.

D.S. Sedelnikova — experiment preparation and experimental work.

O.B. Kolmachikhina — calculations and preparation of the manuscript.

O.Yu. Makovskaya — calculations and analysis of research results.

Статья поступила в редакцию 12.05.2025, доработана 23.05.2025, подписана в печать 29.05.2025

The article was submitted 12.05.2025, revised 23.05.2025, accepted for publication 29.05.2025