

УДК 622.7'1

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-5-12>

Научная статья

Research article



Применение микроволнового излучения для декрипитации сподумена Колмозерского месторождения

О.Н. Криволапова¹, И.Л. Фуреев²¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

² Государственный научно-исследовательский и проектный институт

редкометаллической промышленности (АО «Гиредмет»)

111524, Россия, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 1

✉ Илья Леонидович Фуреев (ifureev@mail.ru)

Аннотация: Литий-ионная промышленность демонстрирует быстрорастущий спрос на Li-содержащие соединения. Сподумен является одним из основных промышленных минералов для производства этого металла. Он имеет 3 полиморфные формы. В природе – это α -сподумен, который обладает высокой устойчивостью к химическому воздействию благодаря своей компактной структуре, содержащей оксиды кремния и алюминия. Микроволновое излучение превращает α -сподумен сначала в γ -, а после в β -форму, и известно, что последняя может подвергаться химическому воздействию с целью извлечения лития. Основываясь на этом факте, была проведена микроволновая процедура воздействия на α -сподумен, направленная на декрипитацию с последующим серно-кислотным разложением минерала, измельченного до разной крупности (1,0, 0,5 и 0,25 мм). Также были проанализированы зависимости изменения температуры при использовании традиционного нагрева. Обычный и микроволновый нагревы образцов различной крупности проводили до достижения температуры 1200 °С. Сульфатизацию прокаленных образцов осуществляли в течение 60 мин при $t = 250$ °С. После охлаждения до 22 °С добавляли дистиллированную воду и перемешивали в течение 120 мин в закрытых сосудах для выщелачивания. Для определения извлечения ценных и попутных компонентов был проведен анализ кеков выщелачивания и жидкой фазы методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. На основе анализа результатов экспериментов обоснована рациональность применения микроволнового излучения для декрипитации сподумена с целью извлечения лития. Изучено влияние крупности на фазовые превращения и, соответственно, степень извлечения лития из сподумена. Показано, что извлечение лития в процессе микроволнового воздействия и выщелачивания класса менее 0,25 мм достигло 96,82 %. Микроволновый нагрев привел к более низким показателям извлечения «вредных» компонентов, таких как железо, натрий и кальций, в процессе выщелачивания, что дает преимущество в чистоте получаемого продукта.

Ключевые слова: литий, сподумен, микроволновое излучение, декрипитация, сульфатизация, выщелачивание.

Для цитирования: Криволапова О.Н., Фуреев И.Л. Применение микроволнового излучения для декрипитации сподумена Колмозерского месторождения. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(6):5–12.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-5-12>

Application of microwave radiation for decrepitation of spodumene from the Kolmozerskoe deposit

O.N. Krivolapova¹, I.L. Fureev²

¹ National University of Science and Technology “MISIS”
4 build. 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

² State Research and Design Institute of the Rare Metal Industry (Giredmet JSC)
2 build. 1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russia

✉ Ilya L. Fureev (ifureev@mail.ru)

Abstract: The lithium-ion industry is experiencing a rapidly growing demand for compounds containing lithium. Spodumene is one of the primary industrial minerals used in the production of this metal. It exists in three polymorphic forms. In its natural state, it is known as α -spodumene, which possesses a high resistance to chemical attack due to its compact structure containing silicon and aluminum oxides. When subjected to microwave radiation, α -spodumene undergoes a transformation, first becoming the γ form and then transitioning to the β form. It is known that the β form can be chemically treated to extract lithium. In light of this, microwave exposure was applied to α -spodumene with the aim of decrepitation, followed by sulfuric acid decomposition of the mineral. The mineral was crushed into different sizes (1.0, 0.5, and 0.25 mm). Temperature changes, induced by both conventional and microwave heating, were analyzed. The heating process was continued for samples of various sizes until a temperature of 1200 °C was reached. Sulfation of calcined samples was carried out for 60 minutes at a temperature of 250 °C. After cooling to 22 °C, distilled water was added and mixed for 120 minutes in closed leaching vessels. To determine the recovery of valuable and associated components, leach cakes and the liquid phase were analyzed using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. Based on the analysis of experimental results, the feasibility of using microwave radiation for decrepitation of spodumene to extract lithium is confirmed. The influence of particle size on phase transformations and, consequently, the degree of lithium extraction from spodumene was investigated. It was found that the recovery of lithium during the microwave action and leaching process for particles smaller than 0.25 mm reached 96.82 %. Microwave heating resulted in lower recovery rates of “harmful” components, such as iron, sodium, and calcium, in the leaching process, leading to a higher purity of the resulting product.

Keywords: lithium, spodumene, microwave radiation, decrepitation, sulfation, leaching.

For citation: Krivolapova O.N., Fureev I.L. Application of microwave radiation for decrepitation of spodumene from the Kolmozerskoe deposit. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(6):5–12. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-5-12>

Введение

Литий — металл, который находит все большее применение в различных отраслях промышленности и технологий. Благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам, таким как высокая удельная теплоемкость, хорошая проводимость и сильная химическая активность, литий постепенно расширил области своего применения от традиционных отраслей промышленности, таких как металлургия, энергетика, аэрокосмический сектор, медицина, до зеленой энергетики, где этот металл сохраняет важнейшие позиции [1–3]. В настоящее время наблюдается рост рынка лития, который в основном обусловлен растущим спросом на накопители энергии [4]. Для удовлетворения спроса на литий к 2030 г. планируется выход на проектную мощность совместного российского предприятия ПАО «ГМК «Норильский никель» и ГК «Росатом» по переработке редкометалльных пегматитов

Колмозерского месторождения (Мурманская обл., Россия) [5].

Серно-кислотное выщелачивание является одним из методов получения карбоната лития из сподуменовых концентратов. Крупнейшим производителем серной кислоты в Мурманской обл. в 2027 г. станет Кольская ГМК, которая планирует запуск производства меди по схеме обжиг—выщелачивание—электроэкстракция [6]. В качестве побочного продукта будет образовываться серная кислота, которую целесообразно использовать в технологии переработки сподумена Колмозерского месторождения.

В настоящее время в промышленности используются три основных источника производства лития [7–9]:

— твердые минеральные ресурсы (сподуменовые, комплексные Li–Be-пегматитовые руды — 50 %, литиевые слюды — 20 %);

— жидкие минеральные ресурсы (рассолы и рапы озер, нефтяные пластовые воды, термальные воды — 20 %);

— вторичное сырье (батареи, аккумуляторы, химические источники тока — 10 %).

Среди промышленных минералов для извлечения лития сподумен является одним из важнейших [10]. Его химический состав представлен оксидом лития (8,1 %), оксидом алюминия (27,4 %) и диоксидом кремния (64,5 %) [11]. Пегматиты Колмозерского месторождения являются важным источником не только лития, но и бериллия, тантала, ниобия и других металлов [12].

Сподумен может существовать в трех модификациях — α , β , γ [1]. Природный сподумен в естественном виде представляет собой кристаллическую структуру, называемую α -фазой. Его β -форма является продуктом рекристаллизации при нагревании α -сподумена при $t = 900\div 1100$ °С [13; 14], где полное превращение происходит до 1100 °С. Сподумен γ -модификации представляет собой метастабильную фазу, возникающую при нагревании до $t = 700\div 900$ °С α -сподумена [2; 15]. Последний представляет собой минерал с очень низкой реакционной способностью и малой степенью извлечения лития, что говорит о необходимости проведения декрипитации [16; 17].

Традиционные методы термической декрипитации имеют ряд недостатков, таких как высокие энергозатраты и негативное воздействие на окружающую среду [18]. Кроме того, доставка углеродородных энергоносителей в регион производства (Мурманская обл.) влечет за собой дополнительные затраты при производстве готовой продукции. В связи с этим следует оценить целесообразность использования микроволнового излучения в сравнении с традиционными методами декрипитации.

По сравнению с обычным нагревом преимуществами микроволнового воздействия могут стать экономия ресурсов, меньшее время обработки, более контролируемый процесс нагрева, а также прямой, бесконтактный, селективный и объемный нагрев [11]. Равномерный нагрев по всему объему материала приводит к повышению пористости минерала-носителя, тем самым сокращая необходимое время спекания и снижая температуру химических реакций, увеличивая при этом диффузию выщелачивающего агента в минерале и улучшая показатели извлечения [12; 19]. Таким образом, использование сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева для декрипитации сподумена может быть эффективным и экономически выгодным методом. Од-

нако для оценки целесообразности его использования требуется дополнительное исследование.

Что касается взаимодействия с микроволнами, материалы делятся на 3 группы: прозрачные, проводящие/непрозрачные и поглощающие [6]. Материалы с низким коэффициентом диэлектрических потерь, такие как сподумен, трудно нагревать. Однако они могут поглощать микроволны при повышенной температуре, поскольку при этом увеличиваются их диэлектрические потери. Поэтому для СВЧ-нагрева таких материалов вместо прямого метода обычно используют комбинированный [20]. При его применении материалы предварительно нагреваются с помощью другого источника до определенной температуры (при которой они становятся более эффективны при поглощении микроволнового излучения), а затем подвергаются воздействию непосредственно микроволнового излучения [13].

Механизм и влияние параметров гибридного микроволнового процесса на структурные изменения сподумена изучены недостаточно. Различия в результатах наблюдений за фазовыми превращениями полиморфных модификаций сподумена при высоких температурах являются вероятным следствием различий размеров зерен, концентраций примесей, аморфных материалов, образующихся при измельчении, а также экспериментальных установок, методов нагрева и измерения температуры [21; 22]. Тем не менее влияние параметров процесса на фазовые превращения сподумена Колмозерского месторождения и его выщелачиваемость до сих пор неизучены.

Поэтому, чтобы использовать потенциальные преимущества микроволновых и прямых методов декрипитации, в настоящей работе рассмотрены прокаливание сподумена с помощью микроволнового излучения, влияние микроволнового и прямого методов при различной крупности материала на фазовые превращения и, соответственно, выщелачиваемость этого минерала, также проведено сравнение микроволнового нагрева со стандартными методами.

Материалы и методы исследования

Минералогические исследования образца показали, что руда Колмозерского месторождения содержит ~20 % сподумена (~1,5÷1,6 % Li_2O), ~30 % кварца, ~30 % альбита, ~15 % микроклина, 5 % мусковита, а также следы циркона и турмалина [23].

Традиционно сподуменные руды обогащают до концентрата с содержанием Li_2O около 5,0—6,0 %

и Fe_2O_3 менее 1 % в качестве сырья для последующих процессов прокаливания и извлечения лития [24]. Для экспериментов был отобран сподумен путем ручной выборки из рудной массы и проанализирован. Образец сначала дробили до крупности –1 мм, далее отквартованные навески измельчали до 100 %-ного содержания классов менее 0,5 и 0,25 мм. Химический состав отквартованных навесок для проведения исследований был следующим, мас. %:

Li_2O	5,6
Al_2O_3	25,1
SiO_2	65,7
Fe_2O_3	0,7
Na_2O	1,0

Для изучения эффективности СВЧ-прокаливания сподуменого концентрата и влияния крупности исходного сырья были проведены опыты по прокаливанию классов крупности менее 1,0, 0,5 и 0,25 мм. Профили зависимости температуры образцов от времени при прямом нагреве приведены на рис. 1.

Образцы классов менее 1,0, 0,5 и 0,25 мм подвергались прямому нагреву в муфельной печи до 1200 °С. В первые 10 мин процесса они имели различную скорость нагрева, по истечении этого времени она уравнивалась и составила примерно 30 °С/мин.

СВЧ-нагрев сподуменого концентрата проводился в микроволновой камере. Она оснащена

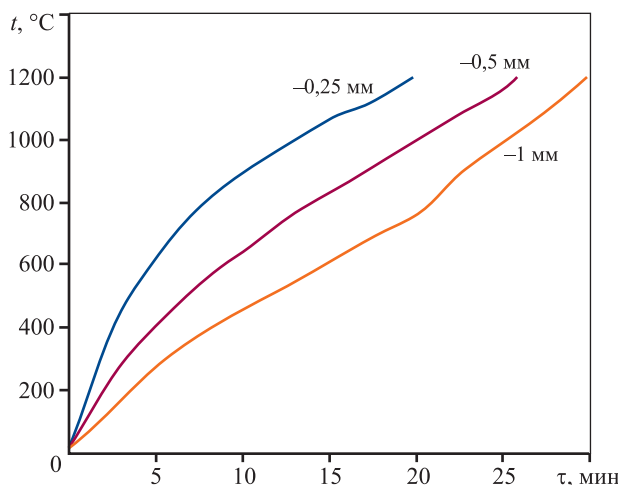


Рис. 1. Зависимость температуры образцов разной крупности от продолжительности нагрева в муфельной печи

Fig. 1. Temperature as a function of heating duration in a muffle furnace

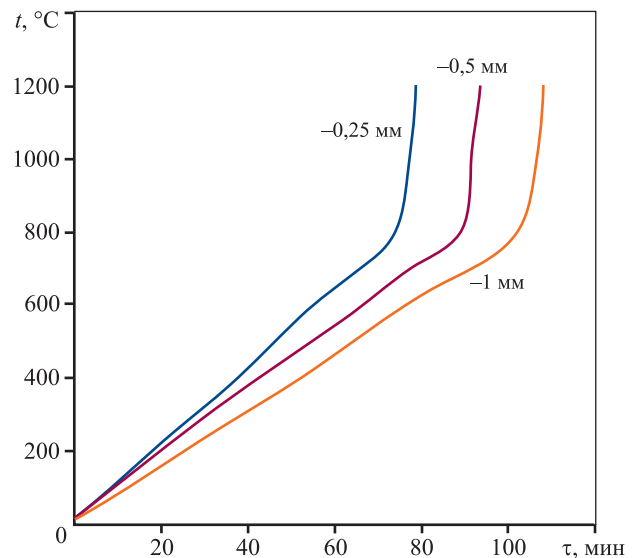


Рис. 2. Зависимость температуры образцов разной крупности от продолжительности микроволнового нагрева

Fig. 2. Temperature as a function of microwave heating duration

независимыми магнетронами и системой контроля, что позволило установить мощность 1 кВт с частотой СВЧ-излучения 2,5 ГГц и снимать температурные показатели. В каждом испытании образец концентрата сподумена массой 100 г помещали в стеклянную посуду, так как она прозрачна для микроволнового излучения. Толщина слоя материала была постоянной — 10 мм. Профили зависимости температуры образцов от времени микроволнового воздействия приведены на рис. 2.

Эффективность микроволнового нагрева зависит от теплофизических свойств образца [25]. Сподумен слабо поглощает СВЧ-излучение при низкой температуре. Скорость нагрева является линейной примерно до 700 °С и составляет около 20 °С/мин, что ниже в сравнении с прямым нагревом в муфельной печи, а после 800 °С она резко возрастает до 70 °С/мин. Это обусловлено изменением диэлектрических свойств сподумена при достижении данной температуры. Критическая ее величина, после которой α-сподумен поглощает микроволновую энергию, как сообщается в литературе, составляет около 634 °С [13], что и объясняет резкий рост скорости его нагрева. Когда температура повышается примерно до 800 °С, профили нагрева быстро становятся почти экспоненциальными, достигая 1200 °С примерно за 6 мин.

Результаты показали, что время, необходимое для повышения температуры с 800 до 1200 °С, бы-

ло намного меньше при использовании микроволнового излучения. Прямой метод нагрева дает лучшие результаты при $t < 800$ °С. Температурные профили, показанные на рис. 1 и 2, свидетельствуют об эффективности гибридного нагрева сподумена.

Температурные профили применения разных методов нагрева свидетельствуют о том, что небольшие частицы сподумена быстрее превращаются в β -сподумен при меньшем времени теплового воздействия. Это означает, что размер частиц влияет как на микроволновый, так и на прямой нагревы сподумена.

Были сопоставлены характеристики выщелачивания образцов, подвергнутых микроволновому и обычному видам прокаливания. Для извлечения лития из прокаленных образцов (т.е. β -сподумена) проводили сульфатизирующий обжиг с последующим выщелачиванием водой. К прокаленному образцу добавляли концентрированную серную кислоту. Затем смесь нагревали в печи при $t = 250$ °С в течение 60 мин. После сульфатизирующего обжига и охлаждения до комнатной температуры добавляли дистиллированную воду и полученную смесь перемешивали в течение 120 мин при комнатной температуре со скоростью 200 об/мин для выщелачивания растворимого сульфата лития, образовавшегося во время обжига. Затем фильтрат отделяли от твердого остатка фильтрованием с использованием воронки Бюхнера, колбы Бунзена и фильтровальной бумаги. Кеки выщелачивания и продуктивные растворы анализировали на содержание Li, Fe, Na и Ca. Исследовали только образцы крупностью менее 0,25 мм.

Результаты и их обсуждение

В таблице представлен баланс металла при традиционном нагреве и микроволновом излучении.

При прямом нагреве извлечение лития составило 97,37 % против 96,82 % при СВЧ. Основываясь на результатах, можно заключить, что α -сподумен обладает весьма низкой реакционной способностью, что свидетельствует о малой эффективности выщелачивания лития. На рис. 3 представлено

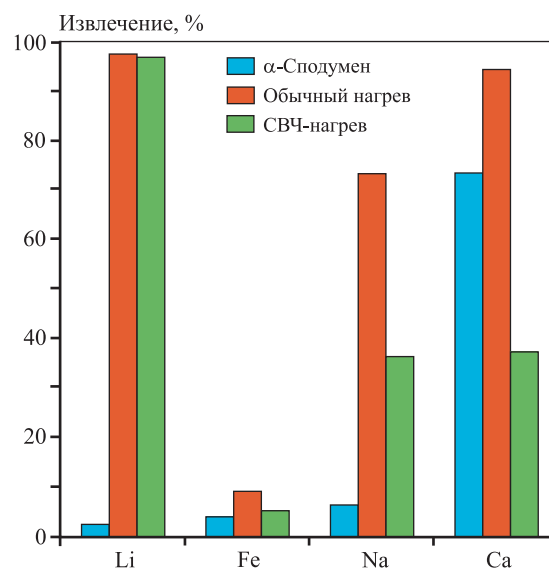


Рис. 3. Извлечение основных элементов при выщелачивании из необработанного и прокаленного с помощью микроволнового и обычного методов нагрева образцов концентрата сподумена

Fig. 3. Extraction of major elements by leaching from initial spodumene concentrates and calcined by microwave and conventional methods

Баланс металла

Metal balance

Продукт	Масса (объем), г (мл)	Содержание, % (г/л)				Извлечение, %			
		Li	Fe	Na	Ca	Li	Fe	Na	Ca
Нагрев в муфельной печи									
Продуктивный раствор	(100,02)	(1,27)	(0,02)	(0,30)	(0,57)	97,37	9,81	72,25	94,32
Кек выщелачивания	98,35	0,03	0,22	0,12	0,03	2,63	90,19	27,75	5,68
Исходный материал	100,00	1,30	0,24	0,42	0,60	100,00	100,00	100,00	100,00
Микроволновый нагрев									
Продуктивный раствор	(100,04)	(1,26)	(0,01)	(0,16)	(0,23)	96,82	5,06	37,36	38,04
Кек выщелачивания	98,23	0,04	0,23	0,27	0,38	3,18	94,94	62,64	61,96
Исходный материал	100,00	1,30	0,24	0,42	0,60	100,00	100,00	100,00	100,00

извлечение железа, натрия и кальция при выщелачивании из необработанного и прокаленного с помощью микроволнового и обычного методов нагрева образцов концентрата сподумена. Полученные результаты показали, что при СВЧ-воздействии извлечение этих элементов было ниже, что дает преимущество перед обычным нагревом в последующих процессах извлечения лития из продуктивных растворов.

Заключение

В работе изучено влияние мощности микроволнового излучения на выщелачиваемость лития. Когда температура повышается примерно до 700 °С, скорость нагрева СВЧ-излучением резко возрастает, достигая 1200 °С примерно за 6 мин. Установлено, что мощность микроволн оказывает существенное влияние на фазовые превращения и, соответственно, выщелачиваемость прокаленных образцов сподуменового концентрата.

Показано, что наиболее эффективным способом нагрева является комбинирование обычного и микроволнового воздействий на образец. Основываясь на результатах проведенных исследований, можно предположить, что нагревание обычным методом целесообразно проводить при температуре до 800 °С, а при ее достижении применять СВЧ-воздействие. Такой способ позволит реализовать максимальную скорость нагрева образцов.

Таким образом, при применении комбинированного метода возможно достигать температуры образцов 1200 °С примерно за 14 мин против 20 и 80 мин при обычном и микроволновом воздействиях соответственно.

При использовании микроволнового излучения было получено извлечение лития 96,82 %, что сравнимо с извлечением из прокаленного образца при обычном нагреве. Кроме того, прокаливание с помощью микроволнового излучения привело к меньшему количеству примесей в фильтрате, что является преимуществом в последующих процессах переработки.

Уточнение полученных результатов возможно при создании опытно-промышленной установки для реализации комбинированной схемы нагрева и проведения дальнейших исследований.

Список литературы/References

1. Salakjani N.K., Singh P., Nikoloski A.N., Production of lithium — a literature review Pt. 1: Pretreatment of

Spodumene. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2020; 41(5):335–348.

<https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1643343>

2. U.S. Geological Survey Mineral commodity summaries 2023. Reston, 2023. 214 p. URL: <https://www.kriittisetmateriaalit.fi/wp-content/uploads/2023/02/Mineral-Commodity-Summaries-2023-USGS-Jan-2023.pdf> (accessed: 15.06.2023).
3. Курков А.В., Мамошин М.Ю., Ануфриева С.И., Рогожин А.А. Прорывные технологии прямого извлечения лития из гидроминерального сырья. В сб.: *Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование: Труды Второй научно-практической конференции с международным участием* (г. Москва, 07–08 декабря 2021 г.). М.: ФГБУ «ВИМС», 2021. С. 175–189.
4. Отчет «Обзор рынка сподумена и гидроксида лития в мире». М.: ООО «ИГ «Инфолайн», 2021.179 с. URL: <http://www.infomine.ru/research/38/650/> (дата обращения: 17.04.2023).
5. Степанов С.С. Совместное предприятие «Норникеля» и «Росатома» получило право на разработку Колмозерского месторождения. URL: <https://www.nornickel.ru/news-and-media/press-releases-and-news/sovместnoe-predpriyatie-nornikelya-i-rosatoma-poluchilo-litsenziyu-na-razrabotku-kolmozerskogo-mestorozhdeniya/> (дата обращения: 15.05.2023).
6. Касиков А.Г., Шелокова Е.А., Яковлев К.А., Корвин В.Н., Глуховская И.В. Сернокислотное разложение сподуменового концентрата Колмозерского месторождения. *Труды Кольского научного центра РАН. Сер.: Технические науки*. 2023;14(2):102–106. <http://dx.doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.2.018> Kasikov A.G., Shchelokova E.A., Yakovlev K.A., Korovin V.N., Glukhovskaya I.V. Sulfuric acid decomposition of the spodumene concentrate of the Kolmozerskoe deposit. In: *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Engineering Sciences*. 2023;14(2):102–106. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.2.018>
7. Tadesse B., Makuei F., Albjanic B., Dyer L. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review. *Minerals Engineering*. 2019;131:170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>
8. Youqi Fan, Hu Li, Chang Lu, Shiliang Chen, Yonglin Yao, Hanbing He, Shuai Ma, Zhen Peng, Kangjun Shao. A novel method for recovering valuable metals from spent lithium-ion batteries inspired by the mineral characteristics of natural spodumene. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 417(7):41–48. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138043>

9. Zhang S.J., Cui L.W., Kong L.H., Jiang A.L., Li J.B. Summarize on the lithium mineral resources and their distribution at home and abroad. *Nonferrous Metals Engineering*. 2020;10(10): 95–104. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1744.2020.10.015>
10. Zhang L., Yang H.P., Liu L., Ding G.F. 2020. Global technology trends of lithium extraction. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*. 2020; 40(5): 24–31. <https://doi.org/10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.05.004>
11. Roskill: CO₂ emissions from lithium production set to triple by 2025. URL: <https://www.greencarcongress.com/2020/10/20201006-roskill.html> (accessed: 13.05.2023).
12. Галева Е.В., Кудряшов Н.М. Редкометальные пегматитовые месторождения зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья (Кольский регион). В сб.: *Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. Апатиты: Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, 2022. С. 37–41. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.007>
13. Dessemond C., Soucy G., Harvey J.P., Ouzilleau P. Phase transitions in the α – γ – β spodumene thermodynamic system and impact of γ -spodumene on the efficiency of lithium extraction by acid leaching. *Minerals*. 2020; 10(6):98-107. <http://dx.doi.org/10.3390/min10060519>
14. Alhadad M.F., Oskierski H.C., Chischi J., Senanayake G., Dlugogorski B.Z. Lithium extraction from β -spodumene: A comparison of keatite and analcime processes. *Hydrometallurgy*. 2023;215:15-23. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105985>
15. Salakjani N.Kh., Singh P., Nikoloski A.N. Acid roasting of spodumene: Microwave vs. conventional heating. *Minerals Engineering*. 2019;138:161–167. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.05.003>
16. Морозова Л.Н., Базай А.В. Сподумен — основной источник лития редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения. В сб.: *Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. Апатиты: Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, 2022. С. 369–373. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.070>
17. Yunfeng S., Tianyu Z., Lihua H., Zhongwei Z., Xuheng L., A promising approach for directly extracting lithium from α -spodumene by alkaline digestion and precipitation as phosphate. *Hydrometallurgy*. 2019;189: 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105141>
18. Rezaee M., Han Sh., Sagzhanov D., Hassas B.V., Slawicki T.M., Agrawal D., Akbari H., Mensah-Biney R. Microwave-assisted calcination of spodumene for efficient, low-cost and environmentally friendly extraction of lithium. *Powder Technology*. 2022;397:115–132. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.036>
19. Quartaroli L., Brandão B., Silveira A., Nakamura M., Toma H. Improving the lithium recovery using leached beta-spodumene residues processed by magnetic nanohydrometallurgy. *Minerals Engineering*. 2022;186:223-241. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107747>
20. Nobuyuki M., Shoki K., Eiji M. Microwave-based extractive metallurgy to obtain pure metals: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021;5:13–28. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100306>
21. Zhu Y., Zhang D., Qiu S., Liu C., Yu J., Can J. Lithium recovery from pretreated α -spodumene residue through acid leaching at ambient temperature. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2023;101(8):4360–4373. <https://doi.org/10.1002/cjce.24806>
22. Yoğurtcuoğlu E. Investigation of the effect of cyanidation after microwave roasting treatment on refractory gold/silver ores by characterization studies. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2023;59(1):14–21. <https://doi.org/10.37190/ppmp/157487>
23. Фурев И. Л., Нерадовский Ю. Н. Выбор рациональной технологии переработки руды Колмозерского месторождения на основе изучения химического и минерального составов рудоразборной пробы. *Труды Кольского научного центра РАН. Сер.: Технические науки*. 2023;14(1):245–249. <http://dx.doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.1.044>
- Fureev I.L., Neradovsky Yu. N. Choice of rational technology for processing ore from the Kolmozerskoe deposit based on the study of the chemical and mineral composition of the ore-gathering sample. In: *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Engineering sciences*. 2023;14(1):245–249. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.1.044>
24. Tadesse B., Makuei F., Albijanac B., Dyer L. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review. *Minerals Engineering*. 2019;131:170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>
25. Volpi M., Pirola C., Rota C., Joaquim A., Carnaroglio D. Microwave-assisted sample preparation of α -spodumene: A simple procedure for analysis of a complex sample. *Minerals Engineering*. 2022;187:33–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107820>

Информация об авторах

Ольга Николаевна Криволапова – к.т.н., доцент кафедры цветных металлов и золота, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».
<https://orcid.org/0000-0002-5055-9430>
E-mail: onk@misis.ru

Илья Леонидович Фуреев – руководитель направления лаборатории комплексной переработки рудного сырья, Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности (АО «Гиредмет»)
<https://orcid.org/0009-0007-7674-526X>
E-mail: ifureev@mail.ru

Information about the authors

Olga N. Krivolapova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Nonferrous Metals and Gold, National University of Science and Technology “MISIS”.
<https://orcid.org/0000-0002-5055-9430>
E-mail: onk@misis.ru

Ilya L. Fureev – Head of the Department of the Laboratory for the Complex Processing of Ore Raw Materials, State Research and Design Institute of Rare Metal Industry (JSC “Giredmet”).
<https://orcid.org/0009-0007-7674-526X>
E-mail: ifureev@mail.ru

Вклад авторов

О.Н. Криволапова – определение цели работы, руководство экспериментами, написание текста статьи.

И.Л. Фуреев – подготовка смеси и исходных образцов, проведение лабораторных экспериментов, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

O.N. Krivolapova – determined the purpose of the work, supervised the experiments, wrote the article.

I.L. Fureev – prepared mixtures and initial samples, conducted laboratory experiments, participated in the discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023, доработана 08.10.2023, подписана в печать 10.10.2023

The article was submitted 04.09.2023, revised 08.10.2023, accepted for publication 10.10.2023