

Научная статья
УДК 622.78:553.493.34
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.009

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ АКТИВАЦИИ ТРУДНОВСКРЫВАЕМЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВА

**Наталья Анатольевна Пермякова¹, Елена Германовна Лихникевич²,
Светлана Ивановна Ануфриева³**

^{1, 2, 3}*Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени
Н. М. Федоровского, Москва, Россия*

¹*permyakova@vims-geo.ru*

²*likhnikievich@vims-geo.ru*

³*anufrieva@vims-geo.ru*

Аннотация

Показана перспективность методов предварительной активации сподуменового концентрата (механическое активирование, энергетическое воздействие, высокочастотная электромагнитная обработка). Установлено повышение реакционной способности α -сподумена при сульфатизации активированного сподуменового концентрата.

Ключевые слова:

литий, сподумен, сульфатизация, декрипитация, механоактивация, СВЧ-обработка, энергетическое воздействие, аморфизация

Для цитирования:

Пермякова Н. А., Лихникевич Е. Г., Ануфриева С. И. Современные методы предварительной активации трудновскрываемых концентратов обогащения руд редкометалльных пегматитов: Технологическая эффективность и перспектива // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 56–59. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.009.

Original article

MODERN METHODS OF PRELIMINARY ACTIVATION OF HARD-TO-OPEN CONCENTRATES OF ORE ENRICHMENT OF RARE METAL PEGMATITES: TECHNOLOGICAL EFFICIENCY AND PERSPECTIVE

Natalia A. Permyakova¹, Elena G. Likhnikievich², Svetlana I. Anufrieva³

^{1, 2, 3}*All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky,
Moscow, Russia*

¹*permyakova@vims-geo.ru*

²*likhnikievich@vims-geo.ru*

³*anufrieva@vims-geo.ru*

Abstract

The promising methods of preliminary activation of spodumene concentrate are shown (mechanoactivation, energy impact, high-frequency electromagnetic processing). An increase in the reactivity of α -spodumene was found during sulfatization of activated spodumene concentrate.

Keywords:

lithium, spodumen, sulfatization, decription, mechanoactivation, microwave processing, energy impact, amorphization

For citation:

Permyakova N. A., Likhnikievich E. G., Anufrieva S. I. Modern methods of preliminary activation of hard-to-open concentrates of ore enrichment of rare metal pegmatites: Technological efficiency and perspective // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 56–59. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.009.

Введение

Современной России в эпоху нового геополитического характера для сохранения технологического суверенитета и обеспечения национальной безопасности необходимо наращивать сырьевые резервы критически значимых, дефицитных стратегических металлов. Данная стратегия стала определяющим

фактором для начала активного развития литейной отрасли на территории Российской Федерации [1]. Основным отечественным источником получения лития являются геологические комплексы редкометалльных пегматитов [2; 3], содержащие трудноскрываемый минерал лития — α -сподумен, кристаллохимические особенности которого обуславливают его высокую химическую устойчивость.

Для эффективного решения проблемы извлечения лития из трудноскрываемых сподуменных концентратов необходимо совершенствование технологий его переработки, направленных на интенсификацию процессов вскрытия посредством использования эффективных методов воздействия на структуру сподумена — методов предварительной активации (механическое и энергетическое активирование, СВЧ-активация, ультразвуковая обработка и др.) [4–6].

Результаты и обсуждение

Универсальным и высокоэффективным способом вскрытия сподуменсодержащих концентратов (СК) является декрипитационно-серноокислотный метод (высокотемпературная обработка концентрата с последующей его сульфатизацией) [7; 8], характеризующийся высокими энергозатратами. Применение методов предварительной активации СК открывает перспективы для возможного исключения энергоемкой операции декрипитации.

На пробе СК одного из месторождений Восточного Забайкалья (1,75 % Li, 18,6 % Al_2O_3 , 71,4 % SiO_2) крупностью -0,074 мм апробированы методы предварительной активации (энергетическое воздействие, высокочастотная электромагнитная обработка, механическое активирование) и проведена сравнительная оценка показателей эффективности сульфатизации исходного (без декрипитации), декрипитированного и предварительно активированных недекрипитированных проб СК. Декрипитацию проводили при температуре выше 1 000 °C в течение 1 ч. Сульфатизацию всех исследуемых проб СК осуществляли в едином технологическом режиме ($\text{СК}:\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{конц})} = 1:1$, $\tau = 2$ ч, $t = 250$ °C) с последующим водным выщелачиванием сульфатной массы при комнатной температуре.

Энергетическое воздействие на СК осуществлялось в электромагнитных аппаратах ЭМА-50 с магнитокипящим слоем (рис. 1) за счет воздействия переменного электромагнитного и постоянного магнитных полей с одновременным механическим воздействием сферических гранул из гексаферрита бария (рис. 2) или стронция. Рентгеноструктурным анализом активированных проб СК установлено, что при увеличении продолжительности электромагнитного воздействия на СК с 5 до 13 мин наблюдается уменьшение интенсивности дифракционных отражений сподумена и увеличение их полуширины (от 0,127 ° θ до 0,162 ° θ). Увеличение дисперсности свидетельствует о возможной аморфизации сподумена, и, как следствие, повышается его реакционная способность.



Рис. 1. Электромагнитный аппарат ЭМА-50



Рис. 2. Магнитные гранулы гексаферрита бария для ЭМА

Механическое активирование исследуемого СК проведено на лабораторной планетарной шаровой мельнице «Активатор-4М» при следующих параметрах обработки: материал мелющих тел — сталь ШХ15СГ, диаметр мелющих тел — 5 мм, соотношение шары:СК — 6:1, ускорение мелющих тел — 80 G (800 м/с^2), время обработки — 3 мин. Рентгеноструктурным анализом было установлено уменьшение размеров областей когерентного рассеивания с 947 до 463 Å, а также повышение доли изменения энергии кристаллической решетки сподумена, что свидетельствует об его аморфизации и, по всей видимости, снижении химической устойчивости.

СВЧ-активация СК проводилась в микроволновой системе обработки рудного материала МС-10 (рис. 3, 4). Путем комплексного воздействия электромагнитных импульсов в СВЧ-диапазоне (мощность микроволнового излучения 1 000–1 500 Вт, частота излучения СВЧ-генератора 2 450–2 540 МГц) при температуре от 150 до 210 °С и давлении 5–13 атм достигнута объемная аморфизация сподумена.



Рис. 3. Микроволновая система МС-10

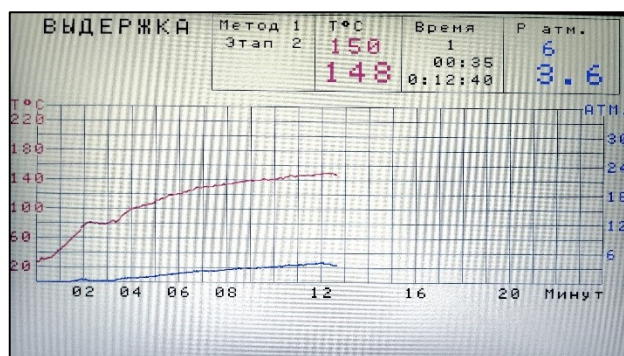


Рис. 4. Технологические кривые выхода на режим задаваемых параметров СВЧ-обработки

Проведена оценка эффективности методов предварительной активации СК путем сопоставления степени извлечения лития в раствор при сульфатизации активированных и неактивированных проб СК (таблица). Так, за 13 мин энергетического воздействия на недекрипитированный СК степень извлечения лития в сернокислый раствор повысилась с 8,3 до 30 %. Положительная динамика в показателях извлечения лития в раствор наблюдается и при сульфатизации предварительно механоактивированной пробы. За 20 мин СВЧ-обработки СК при температуре 210 °С и давлении в системе 13 атм степень извлечения лития в сернокислый раствор составляет порядка 38 %.

Результаты исследований по влиянию методов предварительной активации на показатели сернокислотного вскрытия СК

Метод предварительной активации	Выход кека, %	Содержание в кеке Li_2O , %	Извлечение в раствор Li_2O , %
Без декрипитации	98,1	3,5	8,3
Декрипитация	98,8	0,27	92,8
ЭМА-активация	98,8	2,64	30,4
Механоактивация	99,2	2,93	28,1
СВЧ-активация	91,0	2,55	38,3

Выводы

Таким образом, методами предварительной активации исследуемого СК удалось достичь частичной аморфизации α -сподумена, что позволило повысить его реакционную способность. При этом полученные показатели сульфатизации предварительно активированного СК ($E_{\text{Li}_2\text{O}} = 28,1\text{--}38,0\%$) хоть и не позволяют говорить о возможности полного исключения стадии декрипитации, но открывают предпосылки для снижения ее температуры и продолжительности. Перспективу методов предварительной активации СК для снижения химической инертности α -сподумена следует связывать с оптимизацией режимных параметров: для энергетической и механической обработки рудного материала следует предусмотреть

дополнительные воздействия (мощные электромагнитные поля, индукционные токи и их разряды, акустические колебания, температура) с одновременным увеличением продолжительности обработки; для СВЧ-активации — значительное расширение диапазона СВЧ-колебаний, использования химически агрессивных сред в реакционной зоне СВЧ-камеры.

Список источников

1. Мировой дефицит во благо Родины [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://rareearth.ru/ru/pub/20240615/04400.html?ysclid=mer5xfw6b0800495547> (дата обращения: 15.07.2025).
2. Современные технологии освоения минерально-сырьевой базы лития / А. В. Курков, Е. Г. Лихникевич, С. И. Ануфриева, Т. Д. Онтоева, А. А. Рогожин, Н. А. Пермякова // Минеральное сырье. № 35. М.: ВИМС, 2018. С. 74.
3. Гинзбург А. И. Сподумен и процессы его изменения // Труды минералогического музея. 1959. Вып. 9. С. 19–52.
4. Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Жирнов Е. Н. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988. 208 с.
5. Nobuyuki M., Shoki K., Eiji M. Microwave-based extractive metallurgy to obtain pure metals: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021; 5:13–28.
6. Microwave-assisted calcination of spodumene for efficient, low-cost and environmentally friendly extraction of lithium / M. Rezaee, Sh. Han, D. Sagzhanov, B. V. Hassas, T. M. Slawewski, D. Agrawal, H. Akbari, R. Mensah-Biney // *Powder Technology*. 2022. V. 397. P. 24–28.
7. Самойлов В. И. Исследование современных и разработка перспективных методов извлечения лития из минерального сырья в технические соединения. Усть-Каменогорск: Медиа-Альянс, 2005. 276 с.
8. Сернокислотное выщелачивание сподуменового концентрата Колмозерского месторождения / А. Г. Касиков, Е. А. Щелокова и др. // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 102–106.

References

1. Mirovoi defizit vo blago Rodiny [Global deficit for the benefit of the Motherland] (In Russ.) Available at: <https://rareearth.ru/ru/pub/20240615/04400.html?ysclid=mer5xfw6b0800495547> (accessed 15.07.2025).
2. Kurkov A. V., et al. *Sovremennye tehnologii osvoeniya mineral'no-syr'evoi bazy litiya* [Modern technologies for the development of the lithium mineral resource base]. Moscow, VIMS, 2018, 74 p. (In Russ.).
3. Ginzburg A. I. *Spodumen i processy ego izmeneniya* [Spodumen and the processes of its change]. *Trudy mineralogicheskogo muzeia* [Proceedings of the mineralogical museum], 1959, No. 9, pp. 19–52. (In Russ.).
4. Molchanov V. I. *Aktivaziya mineralov pri izmel'chenii* [Activation of minerals during grinding]. Moscow, Nedra, 1988, 208 p. (In Russ.).
5. Nobuyuki M., Shoki K., Eiji M. Microwave-based extractive metallurgy to obtain pure metals: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, 5:13–28.
6. Rezaee M., et al. Microwave-assisted calcination of spodumene for efficient, low-cost and environmentally friendly extraction of lithium. *Powder Technology*, 2022, V. 397, pp. 24–28.
7. Samoilov V. I. *Issledovanie sovremennykh i razrabotka perspektivnykh metodov izvlecheniya litiya iz mineral'nogo syr'ya v tekhnicheskie soedineniya* [Research of modern and development of promising methods of lithium extraction from mineral raw materials into technical compounds]. Ust'-Kamenogorsk, Media-Al'yans, 2005, 276 p. (In Russ.).
8. Kasikov A. G., et al. *Sernokislotnoe vyschelachivanie spodumenovogo koncentrata Kolmozerskogo mestorogdeniya* [Sulfuric acid leaching of the spodumene concentrate of the Kolmozersky deposit]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences], 2023, vol. 14, No. 2, pp. 102–106. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. А. Пермякова — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;
Е. Г. Лихникевич — доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник;
С. И. Ануфриева — кандидат химических наук, заведующий технологическим отделом.

Information about the authors

N. A. Permyakova — PhD in Engineering, leading researcher;
E. G. Likhnikievich — DSc (Geology and Mineralogy), Principal Researcher;
S. I. Anufrieva — PhD in Chemistry, Head of the Technology Department.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 08.07.2025.
The article was submitted 03.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 08.07.2025.