



## ПЕРЕРАБОТКА ЛИТИЕВЫХ РУД МЕТОДАМИ КИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Рахимбаев Берек <sup>1</sup>[0000-0003-3852-200X], Хасанов Абдурашид <sup>2</sup>[0009-0007-1053-3790],  
Туробов Шахриддин <sup>3</sup>[0000-0001-5646-6588], Намазов Суннат <sup>4</sup>[0000-0002-0622-3702]

<sup>1</sup>Физико-технический институт, Республика Казахстан, к.т.н.

<sup>2</sup>Заместитель главного инженера по науке АО «Алмалыкский ГМК», д.т.н., профессор,  
Республика Узбекистан

<sup>3</sup>Доцент кафедры «Металлургии» Навоийского государственного горно-технологического  
университета, PhD., Республика Узбекистан

<sup>4</sup>Доцент кафедры «Металлургии» Навоийского государственного горно-технологического  
университета, PhD., Республика Узбекистан

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию методов извлечения лития из его природных минералов, таких как сподумен и лепидолит. Рассматриваются основные подходы к переработке сырья, включая декриптацию, сернокислотное разложение и прямое кислотное выщелачивание. Особое внимание уделено анализу эффективности процессов и оптимизации условий извлечения лития. Приведены результаты исследований кинетики реакций и влияния температуры, кислотности и состава реагентов на выход лития. Также рассматриваются перспективы переработки литиевых руд в условиях растущего спроса на литий для аккумуляторных технологий и других промышленных приложений. Работа подчеркивает важность разработки энергосберегающих и экологически безопасных методов переработки литиевых минералов.

**Ключевые слова:** литий, сподумен, лепидолит, извлечение лития, кислотное выщелачивание, сернокислотное разложение, переработка литиевых минералов, кинетика выщелачивания.

**Annotatsiya.** Ushbu maqola litiyning tabiiy minerallari, xususan, spodumen va lepidolitdan ajratib olish usullarini o'rganishga bag'ishlangan. Xomashyoni qayta ishlashning asosiy yondashuvlari, jumladan dekriptatsiya, sulfat kislotali parchalash va to'g'ridan-to'g'ri kislotali ishqorlash jarayonlari ko'rib chiqiladi. Litiyning ajratib olish samaradorligini tahlil qilish va sharoitlarni optimallashtirishga alohida e'tibor qaratilgan. Reaksiyalar kinetikasi, harorat, kislotalilik va reagent tarkibining litiy chiqishiga ta'siri bo'yicha tadqiqot natijalari keltirilgan. Shuningdek, akkumulyator texnologiyalari va boshqa sanoat qo'llanmalari uchun litiy bo'lgan talabning o'sishi sharoitida litiy rudasini qayta ishlash istiqbollari ko'rib chiqilgan. Ushbu ish litiy minerallarini qayta ishlashda energiya tejankor va ekologik xavfsiz usullarni ishlab chiqish ahamiyatini ta'kidlaydi.

**Kalit so'zlar:** litiy, spodumen, lepidolit, litiyning ajratib olish, kislotali ishqorlash, sulfat kislotali parchalash, litiy minerallarini qayta ishlash, ishqorlash kinetikasi.

**Abstract.** This article focuses on the study of methods for extracting lithium from its natural minerals, such as spodumene and lepidolite. The main approaches to raw material processing are considered, including decrepitation, sulfuric acid decomposition, and direct acid leaching. Particular attention is paid to analyzing the efficiency of the processes and optimizing the conditions for lithium extraction. The research results on reaction kinetics and the effects of temperature, acidity, and reagent composition on lithium yield are presented. The prospects for processing lithium ores under the conditions of growing demand for lithium in battery technologies and other industrial applications are also discussed. The study emphasizes the importance of developing energy-efficient and environmentally safe methods for processing lithium minerals.

**Keywords:** lithium, spodumene, lepidolite, lithium extraction, acid leaching, sulfuric acid decomposition, lithium mineral processing, leaching kinetics.

### Введение

Литий – самый легкий из природных химических элементов с плотностью всего 0,534 г/см<sup>3</sup>. Это химически активный металл серебристо-белого цвета, обладающий мягкостью и пластичностью, позволяющей разрезать металлический литий обычным ножом. В земной коре литий в основном присутствует в виде различных соединений с



массовой долей примерно 0,0065%. Существует три основных типа природных источников лития: рассолы (хлоридно-сульфатные, карбонатные, хлоридные и нитратные), пегматиты (сподумен, лепидолит, цинвальдит и др.) и осадочные породы (бокситы, уголь, каолин и т.д.) [1]. Дополнительно значимыми источниками считаются глинистые породы и озерные эвапориты. Основные мировые запасы лития сосредоточены в Южной и Северной Америке, Австралии и Китае [2]. Рассолы Боливии, Аргентины и Чили, содержащие более 55% мировых запасов лития, формируют так называемый «литиевый треугольник» [3]. В Австралии находятся одни из крупнейших и наиболее богатых месторождений лития, в основном представленных сподуменом [4]. Китай обладает значительными запасами как рассолов, так и лепидолита.

В прошлом литий в основном использовался в качестве добавки в керамике и стекольной промышленности для улучшения свойств продукции. С развитием глобальной электрификации, литий широко используется в энергетике в качестве важного сырья для новых аккумуляторных технологий. Согласно Обзора минерального сырья за 2024 г. Геологической службой США, глобальное потребление лития подскочило с 20 000 до 120 000 тонн с 2010 по 2024 год [5]. Доля потребления лития в сфере аккумуляторов увеличилась с 23% до 74%. Аккумуляторы превзошли керамику и стекло, и стали самым большим потребителем лития. Кроме того, литий в настоящее время используется в смазочных материалах, непрерывном литье, производстве полимеров, очистке воздуха и других областях. Литий был назван самым важным энергетическим металлом 21 века не только для аккумуляторов, но и для управляемого ядерного синтеза. Литий является необходимым сырьем для производства трития, играющего незаменимую роль в управляемых термоядерных реакциях.

Минералы лития в природе в основном существуют в виде алюмосиликатов в пегматитах [6]. Пегматиты образуются при медленной и определенной кристаллизационной дифференциации высоко летучей магмы в определенных условиях. Сильный метасоматоз встречается в пегматитах в процессе формирования. Пояс метасоматоза представлен кварцем, альбитом, сподуменом, слюдой, бериллом, ниобиевым танталитом, цезиевым гранатом, апатитом и урановыми минералами, и становится значительным месторождением редких металлов. Наиболее типичные литиевые минералы – сподумен и лепидолит. Основные методы извлечения лития из сподумена и лепидолита, а также из других минералов приведены ниже.

Сподумен ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ) обычно серовато-белый с желтоватым или зеленоватым оттенком, часто ассоциируется с кварцем, полевым шпатом и слюдой, с удельным весом 3,1-3,2. Химический состав (массовая доля) сподумена составляет 8,07 %  $\text{Li}_2\text{O}$ , 27,44 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 64,49 %  $\text{SiO}_2$ . Литий также может быть замещен натрием. Таким образом, фактическое содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  в сподумене может варьироваться в пределах 2,9-7,6 %. Сподумен в настоящее время является наиболее важным минералом в добычи лития [7]. К наиболее распространенным методам относятся обжиг, декриптация и сернокислотное разложение, прямое кислотное выщелачивание, щелочное выщелачивание при высоком давлении и обжиг с солями.

Метод декриптации и сернокислотного разложения наиболее распространенный метод переработки сподумена, но он имеет ряд недостатков, заключающиеся в высоких энергозатрах и потреблении серной кислоты, процесс протекает при температуре свыше  $1000^\circ\text{C}$  и избытке концентрированной серной кислоты.

Литий, обладая уникальными физико-химическими свойствами, играет важнейшую роль в современных технологиях и промышленности. Его востребованность значительно возросла в последние годы в связи с глобальной электрификацией и развитием аккумуляторных технологий. Природные источники лития, включая рассолы, пегматиты и осадочные породы, обеспечивают основу для



добычи и переработки этого ценного элемента. Основные запасы лития сосредоточены в Южной Америке, Австралии и Китае, что определяет их стратегическую значимость для мировой экономики.

### Метод прямого кислотного выщелачивания

Для прямого выщелачивания лития из природного сырья использовали смесь плавиковой и серной кислот. Основной поток прямое кислотное выщелачивание представлен на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** 1.

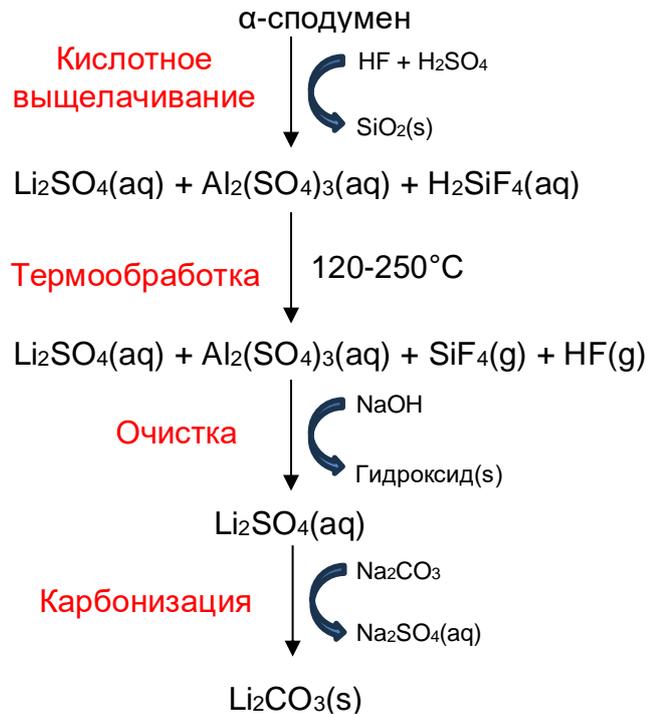
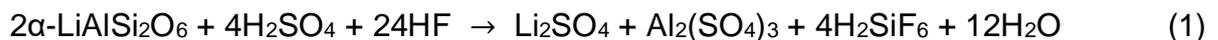


Рис.1. Прямое кислотное выщелачивание

Разрушение минеральных структур достигается при низких температурах. Оптимальная дозировка кислоты составляет 1:3:2 (г: мл: мл) для сподумена/ HF/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (реакция 1). При этом 95,8 % лития были успешно извлечены после выщелачивания при 100°C в течении 3 часов.

Кинетика выщелачивания лития соответствовала модели сжимающегося ядра, и контролировалось как химической реакцией, так и диффузией слоя продукта. Эффективная энергия активации составила 32,68 кДж/моль. Нерастворимые продукты, такие как криолит и фторид алюминия, образуют слой продукта на поверхности частиц, что приводит к кинетическому ограничению процесса выщелачивания. Метод прямого кислотного выщелачивания может напрямую перерабатывать α-сподумен, что значительно снижает потребление энергии. фтороводородной кислоты 7% (по объему) была достигнута экстракция лития в более чем 90%.



### Извлечение лития из лепидолита

Лепидолит – следующий по значимости литийсодержащий минерал после сподумена. Молекулярная формула обычно K(Li,Al)<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH,F)<sub>2</sub>. Химический состав лепидолита варьируется из-за разной степени кристаллизационной дифференциации. Как правило, содержание Li<sub>2</sub>O – 1,2-5,9 %, K<sub>2</sub>O – 4,8-13,8 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



– 11,3-28,8 %, SiO<sub>2</sub> – 46,9-60 %. Кроме того, лепидолит также содержит железо, кальций, магний, рубидий, и цезий [8]. Исследований по лепидолиту меньше из-за его сложного состава и значительно более низкого содержания лития, чем сподумен. Однако с ростом спроса на литий лепидолит привлек большее внимание. К основным методам переработки относятся сульфатизирующий обжиг, хлорирующий обжиг, сернокислотное разложение, выщелачивание разбавленной кислотой и щелочное выщелачивание под высоким давлением.

Учитывая восприимчивость лепидолита к кислоте, исследователи предприняли попытку выщелачивания разбавленной кислотой представлен на **Ошибка! Источник ссылки не найден. 2.**

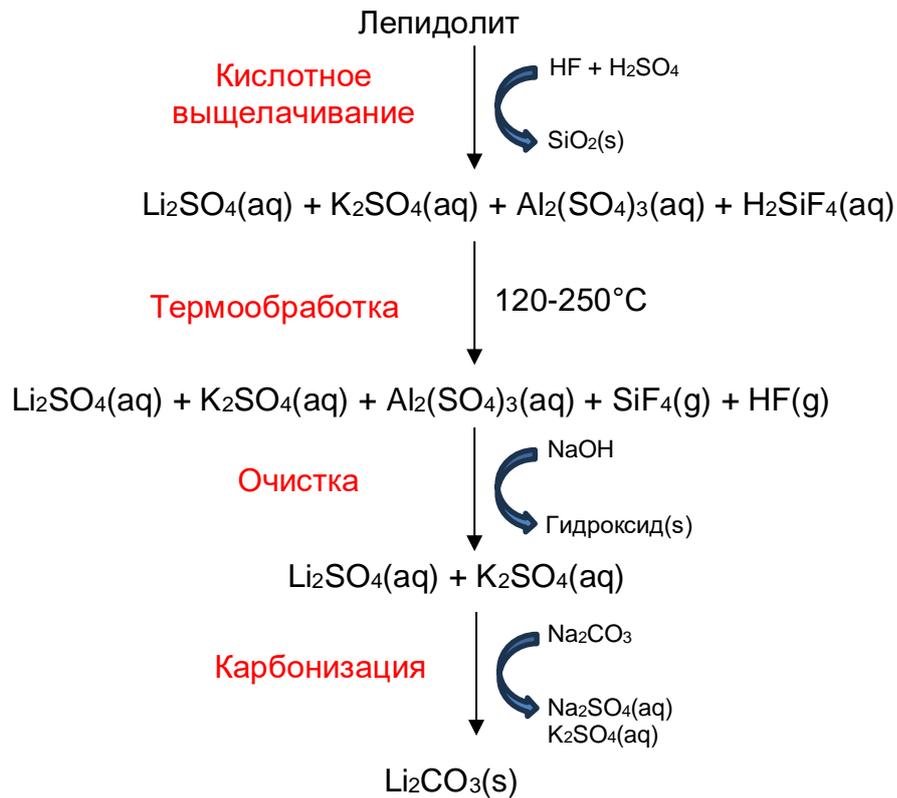
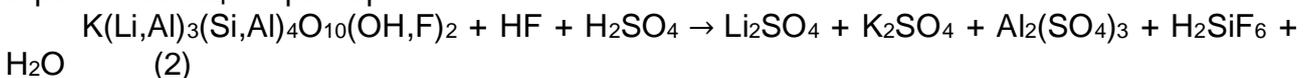


Рис.2. Выщелачивание разбавленными кислотами.

Были проведены исследования выщелачивания при высокой температуре и атмосферном давлении. Выход лития, рубидия и цезия составил 94,2%, 91,8% и 89,2% соответственно, после непрерывного выщелачивания в течении 10 ч при 138°C [7].

Известно об исследованиях по выщелачиванию лепидолита фтором т.к. ионы фтора оказывают сильное эрозивное воздействие на алюмосиликаты. Розалес и др. [10], добились экстракции лития выходом более 90% только с HF (концентрация 7 об.%) при 123°C. Добавление H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ускоряет процедуру реакции выщелачивания. Более 98% лития и 90% рубидия и цезия образовали сульфаты и перешли в раствор. Кинетические данные соответствовали модели сокращающегося ядра. На начальном этапе процесс контролировался межфазными химическими реакциями и внутренней диффузией. По мере протекания реакции, внутренняя диффузия постепенно стала ограничивающим фактором.





## Заключение

В ходе исследования были рассмотрены основные минералы лития, такие как сподумен и лепидолит, и методы их переработки. Сподумен является наиболее важным литийсодержащим минералом, перерабатываемым посредством обжига, кислотного и щелочного выщелачивания. Метод прямого кислотного выщелачивания показал высокую эффективность извлечения лития из сподумена, достигая 95,8% при оптимальных условиях обработки. Этот метод обеспечивает снижение энергозатрат по сравнению с традиционными процессами и демонстрирует высокий потенциал для дальнейшего развития.

Извлечение лития из лепидолита представляет более сложную задачу из-за его изменчивого химического состава. Тем не менее, кислотное выщелачивание с использованием плавиковой и серной кислот показало высокий уровень извлечения лития (более 98%) и сопутствующих элементов, таких как рубидий и цезий. Дальнейшее совершенствование технологий переработки лепидолита может существенно увеличить его экономическую привлекательность как источника лития.

Кинетические исследования процессов выщелачивания показали, что извлечение лития из сподумена и лепидолита подчиняется модели сокращающегося ядра. Основные ограничения связаны с внутренней диффузией и образованием поверхностных слоев продукта, замедляющих реакции. Применение оптимизированных условий кислотного воздействия и добавок позволяет улучшить эффективность процессов.

Таким образом, современные методы переработки литийсодержащих минералов демонстрируют значительные успехи в повышении эффективности извлечения лития. Однако дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение экологической нагрузки, оптимизацию расхода реагентов и повышение устойчивости технологий. Учитывая возрастающий спрос на литий, разработки новых подходов к его добыче и переработке будут играть ключевую роль в обеспечении устойчивого развития энергетического сектора и удовлетворении мировых потребностей в этом стратегическом металле.

Рекомендуется дальнейшая разработка инновационных методов извлечения лития с минимальным воздействием на окружающую среду. Особое внимание следует уделить исследованиям по снижению затрат и переработке отходов, а также внедрению экологически безопасных технологий.

## Список использованных литературы:

- [1.] S.E. Kesler, P.W. Gruber, P.A. Medina, et al., Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits, *Ore Geol. Rev.*, 48(2012), p. 55.
- [2.] Z. Li, H.N. Gu, H. Wen, and Y.Q. Yang, Lithium extraction from clay-type lithium resource using ferric sulfate solutions via an ion-exchange leaching process, *Hydrometallurgy*, 206(2021), art. No. 105759.
- [3.] F. Meng, J. McNeice, S.S. Zadeh, and A. Ghahreman, Review of lithium production and recovery from minerals, brines, and lithium-ion batteries, *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, 42(2021), No. 2, p. 123.
- [4.] J.C. Kelly, M. Wang, Q. Dai, and O. Winjobi, Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium-ion battery cathodes and lithium-ion batteries, *Resour. Conserv. Recycl.*, 174(2021), art. No. 105762.
- [5.] U.S Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2024, U.S. Geological Survey, 2024



[6.] B. Tadesse, F. Makuei, B. Albijanic, and L. Dyer, The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review, *Miner. Eng.*, 131(2019), p. 170.

[7.] H. Hao, Z.W. Liu, F.Q. Zhao, Y. Geng, and J. Sarkis, Material flow analysis of lithium in China, *Resour. Policy*, 51(2017), p. 100.

[8.] P. Xing, C.Y. Wang, Y.Q. Chen, and B.Z. Ma, Rubidium extraction from mineral and brine resources: A review, *Hydrometallurgy*, 203(2021), art. No. 105644.

[9.] J.L. Liu, Z.L. Yin, W. Liu, X.H. Li, and Q.Y. Hu, Treatment of aluminum and fluoride during hydrochloric acid leaching of lepidolite, *Hydrometallurgy*, 191(2020), art. No. 105222.

[10.] G.D. Rosales, E.G. Pinna, D.S. Suarez, and M.H. Rodriguez, Recovery process of Li, Al and Si from lepidolite by leaching with HF, *Minerals*, 7(2017), No. 3, art. No. 36.