

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья
УДК 546.34:666.123.24
EDN: YNRNQC
DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-376-388



Сорбционное извлечение лития из рассола

С.А. Алейников^{1✉}, Н.В. Белоусова²

^{1,2}Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Резюме. Цель – исследовать эффективность извлечения лития из высокоминерализованного хлоридно-кальциевого рассола Сибирской платформы с использованием синтезированного сорбента на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития. Изучение свойств сорбента (набухаемости, механической прочности) проводилось согласно ГОСТ 51641-2000 с использованием орбитального шейкера ELMi S-3L.A20 и высокоточных аналитических весов CAS CAUW-220D. Кинетика сорбции исследовалась в статических условиях. Полная динамическая емкость и динамическая обменная емкость (до «проскока») при скоростях потока рассола от 1-го до 3-х колоночных объемов в час определялись в динамических экспериментах (проведено 100 непрерывных циклов сорбции-десорбции). Анализ растворов на содержание элементов проводился методом АЭС-ИСП с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP 7400 Radial. Согласно проведенным исследованиям, набухаемость сорбента составила 19%, измельчаемость – 1,72%, истираемость – 0,27%. Время достижения полуравновесия при сорбции лития в статических условиях – 3 мин. Статическая обменная емкость составила 5,5 мг/г, полная динамическая обменная емкость – 5,5–5,7 мг/г. При скорости потока рассола 2 колоночных объема в час достигнуто 95%-е извлечение лития. Для промышленного извлечения лития на уровне 95% при скорости потока 1–2 колоночных объема в час требуется 2 колонны (или 3 колонны при скорости потока 3 колоночных объема в час). Показано, что емкость сорбента сохраняется на уровне 5,6 мг/г на протяжении 100 циклов сорбции-десорбции. Соотношение концентрации ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$)/ Li^+ в элюате снижено в 682 раза по сравнению с исходным рассолом. Таким образом, сорбент демонстрирует высокую эффективность для извлечения лития из рассолов с экстремально высоким содержанием ионов кальция. Высокие значения скорости достижения полуравновесия, емкости, механической прочности, а также стабильность работы в 100 циклах сорбции-десорбции подтверждают промышленный потенциал сорбционного извлечения лития из высокоминерализованных хлоридно-кальциевых рассолов.

Ключевые слова: сорбция, литий, слоистые двойные гидроксиды, извлечение лития, рассол

Для цитирования: Алейников С.А., Белоусова Н.В. Сорбционное извлечение лития из рассола // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 376–388 <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-376-388>. EDN: YNRNQC.

METALLURGY

Original article

Lithium sorption from natural brine

Sergey A. Aleynikov^{1✉}, Natalia V. Belousova²

^{1,2}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The study aims to investigate the efficiency of lithium extraction from highly mineralized calcium chloride brine of the Siberian Craton using a synthesized sorbent based on layered aluminum-lithium hydroxide. The research into the sorbent properties (swelling characteristics, mechanical strength) was conducted in accordance with GOST 51641-2000 using an ELMi S-3L.A20 orbital shaker and a high-precision analytical balance CAS CAUW-220D. The sorption kinetics was studied under static conditions. The total dynamic capacitance and dynamic exchange capacity (before “breakthrough”) at brine flow rates from 1 to 3 column volumes per hour were determined in dynamic experiments. 100 continuous sorption-desorption cycles were carried out. The analysis of solutions for the element content was performed by the ICP-AES method with an iCAP 7400 Radial inductively coupled plasma atomic emission spectrometer. According to the conducted research, the swelling capacity of the sorbent was 19%, grindability equaled 1.72%, and abrasion amounted to 0.27%. The time to reach semi-equilibrium during lithium sorption under static conditions was 3 minutes. The total static capacitance equaled 5.5 mg/g; the total dynamic exchange capacity amounted to 5.5–5.7 mg/g. At a brine flow rate of 2 column volumes per hour, 95% lithium extraction was achieved. For commercial lithium recovery at a level of 95% at a flow rate of 1–2 column volumes per hour, 2 columns are required (or 3 columns at a flow rate of 3 column volumes per hour). It is shown that the sorbent capacity is maintained

at a level of 5.6 mg/g throughout 100 sorption-desorption cycles. The concentration ratio ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$)/ Li^+ in the eluate is reduced 682-fold compared to the original brine. Thus, the sorbent demonstrates high efficiency for lithium extraction from brines with extremely high calcium ion content. The high values of the rate of reaching semi-equilibrium, capacity, mechanical strength, as well as operational stability over 100 sorption-desorption cycles confirm the industrial potential of sorption extraction of lithium from highly mineralized calcium chloride brines.

Keywords: sorption, lithium, layered double hydroxides, lithium extraction, brine

For citation: Aleynikov S.A., Belousova N.V. Lithium sorption from natural brine. *iPolytech Journal*. 2025;29(3): 376-388. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-376-388>. EDN: YNRNQC.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного роста рынка портативных устройств и электромобилей литий становится одним из самых востребованных элементов XXI в. Это связано с тем, что литий является ключевым компонентом литий-ионных аккумуляторов, на долю которых приходится более половины мирового потребления лития. Однако область его применения [1] не ограничивается только аккумуляторами. Литий также играет важную роль в фармацевтической индустрии, где соли лития, такие как оксибутират лития, используются для создания препаратов, применяемых в психиатрии, в частности для лечения биполярного расстройства [2]. В стоматологии литий применяется в составе стеклокерамики на основе силикатов, которая обладает высокой прочностью и долговечностью [3]. Легирование алюминия и его сплавов с литием сопровождается повышением комплекса прочностных коррозионных и эксплуатационных характеристик получаемых сплавов, поэтому более легкие сплавы в системе Al-Cu-Mg-Li (марка 1441) и Al-Mg-Li (марки 1420, 1424) нашли применение в авиационной промышленности [4]. Литий также имеет большое значение в ядерной энергетике, так как изотоп ^6Li характеризуется способностью активно захватывать нейтроны, образуя при этом более легкие элементы – тритий и гелий с высвобождением энергии [5]. Еще одна область использования лития связана с применением 12-октестеарата лития (литиевого мыла) в качестве загустителя для производства смазочных материалов. В отличие от натриевых или кальциевых загустителей, смазочные материалы на основе литиевого мыла обладают эксплуатационными преимуществами, обусловленными лучшей водостойкостью, более высоким рабочим диапазоном температур и повышенной механической стабильностью [6].

Основным литиевым продуктом является его карбонат, который служит прекурсором

ром целого ряда химических соединений [7].

Минерально-сырьевая база лития включает в себя два источника – гидроминеральный и рудный. Литий обладает высокой растворимостью, поэтому подавляющая часть его подтвержденных запасов заключена в литийсодержащих рассолах [8], где он присутствует в виде растворенных солей (в основном сульфатов и хлоридов).

Извлечение лития из рудных источников сопряжено с высокими энергетическими затратами на обогащение, однако получаемый таким способом продукт отличается более высоким качеством. Извлечение лития из соленых озер, как правило, обходится дешевле, чем переработка литиевых руд, но при этом технология испарительного концентрирования требует большого расхода воды и реагентов, внушительного размера производственных площадей, а также значительного времени на испарение, а получаемый таким способом продукт может быть более низкого качества.

Применение испарительной технологии извлечения лития из рассолов ограничивается соотношением Mg/Li в рассоле, поскольку с ростом этого соотношения увеличиваются затраты на реагенты для осаждения труднорастворимых соединений кальция и магния. В частности метод осаждения для извлечения лития в основном применяется для рассолов соляных озер с низким соотношением $\text{Mg}/\text{Li} < 10$, таких как рассолы Salar de Atacama ($\text{Mg}/\text{Li} \approx 6,4$), Silver Peak ($\text{Mg}/\text{Li} \approx 1,43$) и Salar de Hombre Muerto ($\text{Mg}/\text{Li} \approx 1,37$), однако он не применим для извлечения лития из рассолов с высоким соотношением Mg/Li , которые широко распространены по всему миру, например, из соленых озер Yliping (Китай, $\text{Mg}/\text{Li} \approx 90$), Tajjinar (Китай, $\text{Mg}/\text{Li} \approx 37-61$) и Qarhan (Китай, $\text{Mg}/\text{Li} \approx 1600$) [9].

В настоящее время путем испарительного концентрирования рассолов пере-

рабатывается гидроминеральное сырье в Чили (Salar de Atacama), Аргентине (Salar de Hombre Muerto, Salar de Oraroz, Cauchari-Olaroz) и Боливии (Salar de Uyuni) [10], а рудный литий добывается преимущественно в Австралии (Pilgangoora, Mount Marion, Greenbushesmine и др.), Китае (Jiajika) и Бразилии (Grotado Cirilo, Mibra, Minada Cachoeira) [11].

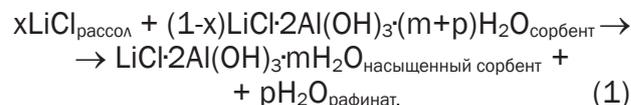
В России добыча рудного лития была остановлена в 1997 г. с закрытием Завитинского месторождения (в Забайкальском крае) сподумена, а добыча гидроминерального лития находится на стадии разведки, оценки запасов и исследований технологий в области его добычи. Подавляющая часть гидроминерального лития в России заключена в подземных рассолах, что создает определенные сложности при его добыче, связанные с затратами на бурение и освоение скважин, однако некоторые литийсодержащие рассолы являются попутным продуктом добычи нефти, газа и конденсата, поэтому добыча лития из гидроминерального сырья может быть реализована на уже разработанных месторождениях нефти и газа с готовой инфраструктурой [12].

Существует ряд технологических решений, позволяющих с определенной степенью селективности извлекать литий напрямую из рассолов, которые в совокупности получили название Direct Lithium Extraction (DLE) [13]. Технологии DLE позволяют существенно снизить удельные затраты на добычу лития и увеличить извлечение лития по сравнению с традиционной технологией испарительного концентрирования, а также извлекать литий из рассолов с высоким содержанием ионов кальция и магния. Одним из таких способов является сорбция лития сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития.

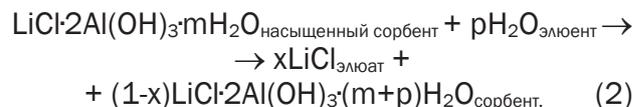
Слоистые двойные гидроксиды (СДГ) – класс соединений, представленный как природными минералами, так и синтетическими аналогами с общей формулой $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{x/n} \cdot yH_2O$. Типичным представителем данного класса соединений является гидроталькит – $[Mg_6Al_2(OH)_{16}][CO_3(H_2O)_4]$, который был обнаружен в 1842 г. [14]. Однако в 1982 г. Карлосом Серна и другими исследователями [15] был синтезирован двойной слоистый гидроксид алюминия-ли-

тия $[Al_2Li(OH)_6]_2CO_3 \cdot nH_2O$, в структуре которого вместо двухвалентных катионов присутствуют моновалентные катионы лития, в связи с чем было предложено расширить номенклатуру СДГ. Уникальное свойство слоистых двойных гидроксидов заключается в способности обмениваться анионами [16], но поскольку ионы лития могут находиться в растворе, они также способны обратимо поглощаться слоистым двойным гидроксидом алюминия-лития в качестве противоиона [17–21].

В общем виде сорбцию лития слоистым двойным гидроксидом алюминия-лития из хлоридного рассола можно представить реакцией (1) [22, 23]:



При снижении общей минерализации реакция протекает в обратном направлении, что соответствует десорбции лития:



Вероятнее всего, механизм десорбции обусловлен гидратацией хлорида лития, протекание которой энергетически более выгодно в среде обессоленной воды.

Главной особенностью данных сорбентов является возможность эффективно извлекать ионы лития только из высокоминерализованных рассолов, поскольку длительный контакт сорбента с водой приводит к структурным изменениям слоистого двойного гидроксида алюминия-лития за счет чрезмерной деинтеркаляции ионов лития, что в конечном результате служит причиной снижения емкости сорбента [24, 25].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании эффективности синтезированного литий-селективного сорбента на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития (для извлечения лития из высокоминерализованного рассола), определении его динамической и статической емкости, а также оценке стабильности сорбента в ходе многократных циклов сорбции-десорбции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сорбции лития использовали литий-содержащий хлоридно-кальциевый рассол Кембрийского водоносного горизонта [26] с общим содержанием солей на уровне 321 г/дм³. Результаты атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) используемого рассола представлены в табл. 1.

Методика синтеза сорбента. Литий-селективный сорбент (далее Al-Li-СДГ сорбент) был синтезирован путем растворения навески хлорида полиалюминия в воде и нейтрализации полученного раствора 2М раствором гидроксида лития в присутствии карбоксиметилцеллюлозы:



Образовавшуюся пасту гранулировали экструзией в цилиндрические гранулы диаметром 0,8 мм, сушили при комнатной температуре в течение четырех суток, затем измельчали в ступке и просеивали через сита с размерами ячейки 2,0 и 0,5 мм. Для дальнейших исследований использовали сорбент классом крупности -2,0+0,5 мм. Внешний вид гранул полученного сорбента представлен на рис. 1.

Методика определения свойств сорбента. Механическая прочность зернистых фильтрующих материалов характеризуется истираемостью и измельчаемостью. В основе методики для определения механической прочности образца Al-Li-СДГ сорбента использовали ГОСТ 51641-2000³. Навеску сорбента массой 150 г промывали водой,



Рис. 1. Внешний вид гранул Al-Li-СДГ сорбента
 Fig. 1. Appearance of Al-Li-LDH adsorbent granules

высушивали и просеивали через сита с размерами ячейки 2,0 и 0,5 мм. Навеску сорбента, прошедшего через сито 2,0 мм и оставшегося на сите 0,5 мм массой 100 г, переносили в 250 см³ колбу, наполненную 150 см³ воды. Колбу герметично закрывали и выдерживали в течение 24 ч при постоянном перемешивании на орбитальном шейкере ELM1 S-3L.A20. После этого сорбент отделяли от воды вакуумной фильтрацией, высушивали и просеивали через сита с размером ячейки 0,5 мм и 0,25 мм. Массовая доля сорбента, прошедшего через сито с размером ячейки 0,5 мм и оставшегося на сите с размером ячейки 0,25 мм, характеризует измельчаемость, а массовая доля

Таблица 1. Результаты атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой анализа литийсодержащего рассола

Table 1. Results of inductively coupled plasma atomic emission analysis (ICP-AES) of lithium-containing brine

Элемент	Содержание, г/дм ³
Li ⁺	0,24
Na ⁺	30,59
K ⁺	12,80
Ca ²⁺	64,93
Mg ²⁺	10,86
BO ₃ ³⁻	1,20
SO ₄ ²⁻	0,15
Сумма солей	≈ 321

³ГОСТ 51641-2000. Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия. Введ. 01.07.2001. М.: Госстандарт России, 2002.

сорбента, прошедшего через сито с размером ячейки 0,25 мм, характеризует истираемость.

Для определения набухаемости навеску сорбента массой 30 г вымачивали в воде и помещали в мерный цилиндр объемом 100 см³ и определяли объем влажного сорбента. Набухаемость определяли по формуле⁴:

$$H = \frac{V_{\text{влажн}} - V_{\text{сух}}}{V_{\text{сух}}} \cdot 100, \quad (4)$$

где H – набухаемость, %; $V_{\text{сух}}$ – объем сухого сорбента, см³; $V_{\text{влажн}}$ – объем влажного сорбента, см³.

Для оценки гидродинамических свойств сорбента была определена зависимость расширения слоя сорбента от линейной скорости потока. Для этого загружали сорбент в ионообменную колонку ВЗОР 30/24/200 и пропускали через нее рассол восходящим потоком с линейной скоростью от 2,5 до 20 м/ч и измеряли высоту слоя взрыхленного сорбента.

Методика определения емкости сорбента в динамических условиях. Для оценки полной динамической обменной емкости (ПДОЕ) наполняли ионообменную колонку ВЗОР 20/16/200 30 см³ синтезированного Al-Li-СДГ сорбента, промывали его водой, а затем проводили насыщение путем пропускания через колонку литийсодержащего рассола перистальтическим насосом восходящим потоком при удельной скорости потока от 1 до 3 колоночных объемов в час (КО/ч), что соответствует значениям от 30 до 90 см³/ч. Выходящий из колонки рафинат фракционировали с помощью коллектора фракций по 5 колоночных объемов (150 см³) и анализировали методом ИСП-АЭС для построения выходных кривых сорбции. Полную динамическую емкость сорбента рассчитывали по формуле:

$$\text{ПДОЕ} = \sum_{i=1}^n \frac{(C_0 - C_i) \cdot V_i}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (5)$$

где C_i – концентрация ионов лития в i -той фракции рафината, мг/дм³; C_0 – концентрация ионов лития в исходном рассоле, мг/дм³;

$m_{\text{сорбента}}$ – масса сорбента, г; V_i – объем i -той фракции рафината, дм³; n – количество фракций рассола, пропущенных через сорбент до полного его насыщения.

Динамическую обменную емкость (ДОЕ) рассчитывали по формуле:

$$\text{ДОЕ} = \sum_{i=1}^n \frac{(C_0 - C_i) \cdot V_i}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (6)$$

где m – количество фракций рассола, пропущенных через сорбент до «проскока» ионов лития в рафинат.

Десорбцию лития проводили нисходящим потоком воды с удельной скоростью потока от 1 до 3 колоночных объемов в час. На выходе из колонки элюат фракционировали с помощью коллектора фракций по 1 колоночному объему (30 см³). Фракции элюата анализировали методом ИСП-АЭС на содержание Li, Na, K, Ca, Mg и В, а полученные данные использовали для построения выходных кривых десорбции лития.

Методика снятия кинетической кривой сорбции лития в статических условиях. Для построения кинетической кривой сорбции в статических условиях навеску сорбента массой 2,76 г переносили в мерный цилиндр, заполненный водой, и определяли объем набухшего сорбента (4 см³). Затем сорбент переносили в колонку и промывали 8-ю колоночными объемами воды при удельной скорости потока 2 КО/ч для десорбции лития. После этого сорбент извлекали из колонки, отделяли от воды вакуум-фильтрацией на фильтре Шотта и сушили. Высушенный сорбент помещали в колбу объемом 250 см³, наполненную 150 см³ литийсодержащего рассола, и запускали перемешивание рассола и сорбента на орбитальном шейкере. Пробу рассола из колбы отбирали по 5 см³ с интервалом 2, 5, 10, 30, 60 и 120 мин. Статическую обменную емкость (СОЕ) определяли по формуле:

$$\text{СОЕ} = \frac{(C_0 - C_{\infty}) \cdot V}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (7)$$

где C_{∞} – равновесная концентрация ионов лития в растворе, мг/дм³; C_0 – концентрация

⁴Рудских В.В. Разработка технологии выделения высокочистых соединений лития из водно-хвостовых растворов установок утилизации литиевых водородсодержащих материалов: дис. ... канд. техн. наук: 02.03.08. М. – Озерск: ИФХЭ РАН, 2022. 137 с.

ионов лития в исходном рассоле, мг/дм³; $m_{\text{сорбента}}$ – масса сорбента, г; V – объем рассола, дм³.

Степень обмена вычисляли по уравнению:

$$F = \frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_\infty}, \quad (8)$$

где C_0 – концентрация ионов лития в растворе в начальный момент времени, мг/дм³; C_t – концентрация ионов лития в растворе в момент времени t , мг/дм³; C_∞ – равновесная концентрация ионов лития в растворе, мг/дм³.

По полученным экспериментальным данным (рис. 7) рассчитывали время полуобмена ($\tau_{1/2}$) при $F = 0,5$. Значение $\tau_{1/2}$ использовали для расчета максимальной удельной скорости пропускания раствора через сорбционную колонну в динамическом режиме (Q). Для динамической сорбции в качестве условия достижения равновесия было выбрано значение времени контакта $10 \cdot \tau_{1/2}$ на основании рекомендации⁴, а значение удельной скорости потока, выраженное в КО/ч, рассчитывали по формуле:

$$Q = \frac{1}{10 \cdot \tau_{1/2}}. \quad (9)$$

Методика проведения ресурсных испытаний. Для оценки стабильности емкостных свойств синтезированного сорбента были проведены ресурсные испытания, которые заключались в осуществлении ста прерывных циклов сорбции-десорбции. Для ресурсных испытаний в качестве оптимальной была выбрана удельная нагрузка 2 КО/ч (60 см³/ч) на сорбции и десорбции. Каждый цикл сорбции длился по 18 ч, каждый цикл

десорбции – по 4 ч. На каждом 5-м цикле отбирали элюат и анализировали методом ИСП-АЭС на содержание лития и основных элементов.

Для выделения концентрированного литиевого элюата и оценки его чистоты сорбционные фракции элюата разделяли на две группы:

Промывные воды (первые 2,0 КО): содержат ионы лития, а также основную долю примесных ионов, вытесняемых из свободного объема колонки.

Литиевый элюат (последующие 6,0 КО): содержат преимущественно ионы лития, десорбированного с сорбента, и характеризуются значительно меньшим содержанием примесей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения литий-селективного сорбента с высокими кинетическими характеристиками были использованы природные полимеры из класса полисахаридов и их производных в качестве связующего вещества. Установили, что получаемые таким образом сорбенты обладают высокой набухаемостью при погружении в водную среду (19% от объема сухого сорбента), что, вероятно, связано со способностью полисахаридов эффективно удерживать воду. При этом сорбент сохраняет достаточную механическую прочность, что предотвращает его разрушение в процессе эксплуатации, обеспечивая стабильность структуры в ходе циклов сорбции-десорбции. В табл. 2 представлены некоторые свойства синтезированного сорбента.

При увеличении скорости восходящего потока рассола в сорбционную колонну происходит расширение слоя сорбента, как показано на рис. 2.

Таблица 2. Свойства синтезированного Al-Li-СДГ сорбента
Table 2. Properties of the synthesized Al-Li-LDH adsorbent

Показатель	Значение
Насыпная плотность сухого сорбента, г/см ³	0,81
Насыпная плотность влажного сорбента, г/см ³	0,68
Измельчаемость, %	1,72
Истираемость, %	0,27
Набухаемость, %	19
Поперечный размер гранул, мм	0,85
Полная емкость по литию, мг/г	5,7
Полная емкость по литию, г/дм ³	3,9

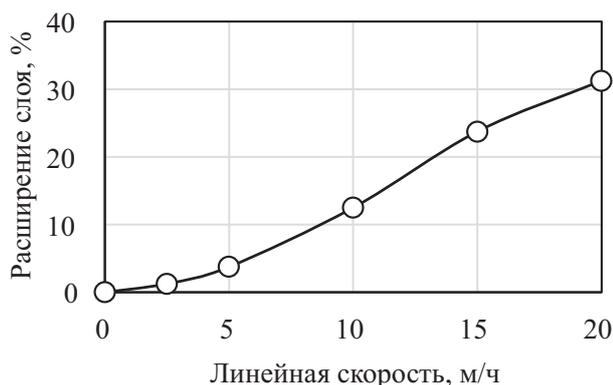


Рис. 2. Расширение слоя Al-Li-СДГ сорбента в зависимости от линейной скорости потока

Fig. 2. Expansion of the Al-Li-LDH adsorbent layer depending on the linear flow rate

Исследование процесса насыщения в динамических условиях показало, что Al-Li-СДГ сорбент поглощает из раствора исключительно ионы лития на фоне высоких концентраций катионов щелочных и щелочноземельных металлов. Это может быть продемонстрировано графиком выходных кривых сорбции лития на фоне прочих элементов (рис. 3), где концентрации Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} остаются неизменными, подтверждая селективность сорбента к Li^+ .

При удельной скорости потока рассола 2 КО/ч сорбент способен извлекать около 95% лития до остаточной концентрации лития около 12 мг/дм³, что соответствует динамической обменной емкости по литию 4,1 мг/г. Полная динамическая обменная емкость сорбента по ионам лития составила 5,7 мг/г.

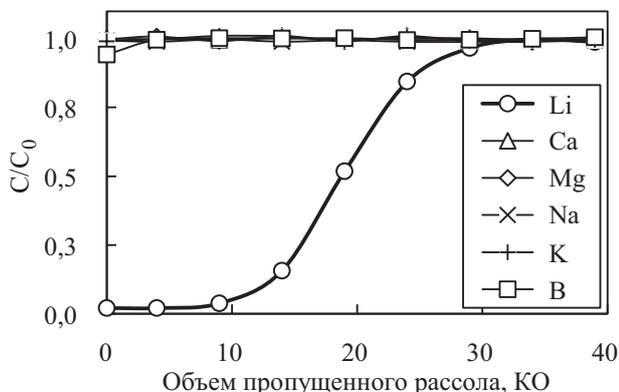


Рис. 3. Выходная кривая сорбции лития и прочих элементов. Удельная скорость потока 2 КО/ч

Fig. 3. Output curve of lithium and other elements adsorption. The specific flow rate is 2 BV/h

Для исследования кинетики сорбции лития двойным слоистым гидроксидом алюминия-лития было проведено насыщение при удельной скорости потока 1, 2 и 3 КО/ч. Как следует из рис. 4, при увеличении удельной скорости потока увеличивается концентрация лития в рафинате, и, как следствие, снижается извлечение лития, а также увеличивается объем рассола, необходимого для полного насыщения сорбента.

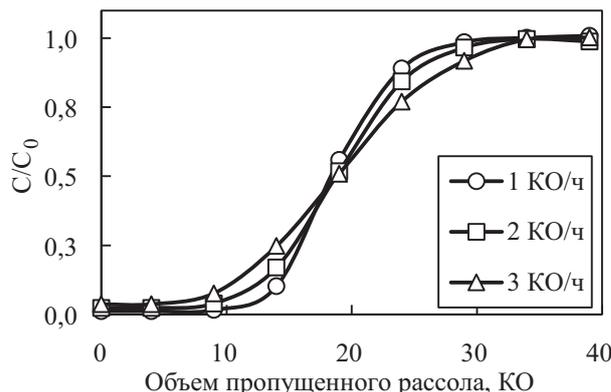


Рис. 4. Выходные кривые сорбции лития при различной удельной скорости потока рассола в колонку

Fig. 4. Output curves of lithium adsorption at different specific flow rates of brine into the column

Поскольку для промышленного извлечения лития сорбцией используется несколько последовательно объединенных колонн, динамическая обменная емкость была рассчитана для целевого извлечения лития на уровне 95% и на основании полученных значений – количество колонн, необходимых для достижения заданного извлечения, используя соотношение (10) [27]:

$$n \geq \frac{2ПДОЕ}{ДОЕ} - 1 \quad (10)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3. Так, для извлечения 95% лития в каскадном режиме при удельной нагрузке 1 и 2 КО/ч достаточно двух колонн, а при увеличении скорости потока до 3-х КО/ч требуется не менее 3-х колонн.

Особенностью десорбции лития с Al-Li СДГ сорбента является то, что между процессами сорбции и десорбции лития отсутствует стадия промывки водой, так как вода используется для десорбции. В связи с этим вытеснение солей из межгрануль-

Таблица 3. Зависимость показателей сорбции лития в динамических условиях Al-Li-СДГ сорбентом от скорости подачи раствора Q

Table 3. Dependence of lithium adsorption parameters by Al-Li-LDH sorbent under dynamic conditions on the flow rate of solution Q

Q, КО/ч	Полная динамическая обменная емкость		Динамическая обменная емкость		n	Извлечение лития, %
	г/дм ³	мг/г	г/дм ³	мг/г		
1	3,91	5,67	3,35	4,86	2	97,9
2	3,94	5,71	2,80	4,06	2	95,1
3	3,94	5,71	1,92	2,78	3	94,5

ного пространства сорбента идет вместе с переходом лития из сорбента в раствор, что наглядно демонстрируется выходными кривыми десорбции (рис. 5), где возрастание концентрации ионов лития сопровождается снижением концентрации примесных элементов. Также можно заметить, что выходная кривая десорбции ионов бора лежит выше кривых для других элементов, что, вероятно, связано с тем, что борат-ион (BO_3^{3-}) поглощается Al-Li-СДГ сорбентом более селективно, чем анион хлора.

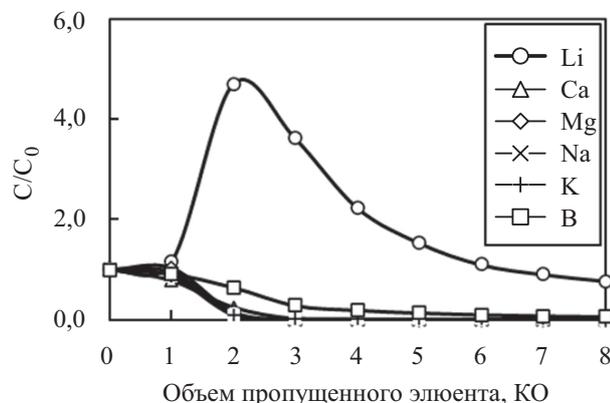


Рис. 5. Выходные кривые десорбции лития и прочих элементов. Удельная скорость потока 2 КО/ч

Fig. 5. Output curves of lithium and other elements desorption. The specific flow rate is 2 BV/h

При снижении скорости потока воды на стадии десорбции лития с 3-х до 1-го КО/ч наблюдается смещение пиков выходных кривых (рис. 6) в сторону более высоких концентраций лития в элюате – с 1,0 до 1,5 г/дм³, а также снижение общего расхода элюента (воды) с 10 до 6 КО. Это подтверждает возможность получения концентрированного продукта при меньшем расходе воды. Практическая значимость результатов заключается в оптимизации ре-

сурсопотребления: снижение расхода воды не только уменьшает эксплуатационные затраты, но и повышает эффективность последующих стадий выделения лития за счет уменьшения объема перерабатываемого раствора. Однако чрезмерное замедление скорости потока может привести к увеличению длительности цикла десорбции, что способно снизить общую производительность установки. Полученные данные подчеркивают необходимость выбора оптимальной удельной скорости потока для конкретных технологических условий.

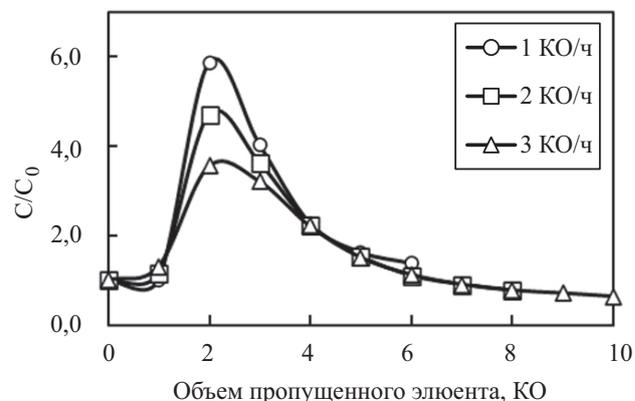


Рис. 6. Выходные кривые десорбции лития при различной удельной скорости потока воды в колонку

Fig. 6. Output curves of lithium desorption at different specific flow rates of water into the column

Рассолы с низкой концентрацией ионов лития требуют более длительного цикла насыщения сорбента. Для минимизации простоев в каскадном режиме сорбции в таких случаях целесообразно применять режим десорбции с низкой удельной скоростью потока воды. Это позволяет синхронизировать этапы сорбции и десорбции, обеспечивая непрерывность процесса. Результаты согласуются с теоретическими ожиданиями.

ми и демонстрируют потенциал метода для промышленного применения, где баланс между скоростью, ресурсосбережением и производительностью является критически важным.

Зависимость емкости сорбента от продолжительности контакта с рассолом в статических условиях представлена на рис. 7. Емкость сорбента в статических условиях составила 5,5 мг/г. Исследование кинетики сорбции лития в статических условиях показало, что время полуобмена ($T_{1/2}$) составило 3 мин, а максимальная удельная скорость потока в динамических условиях, рассчитанная по формуле (9), составила 2 КО/ч. Данная скорость потока далее использовалась для проведения ресурсных испытаний.

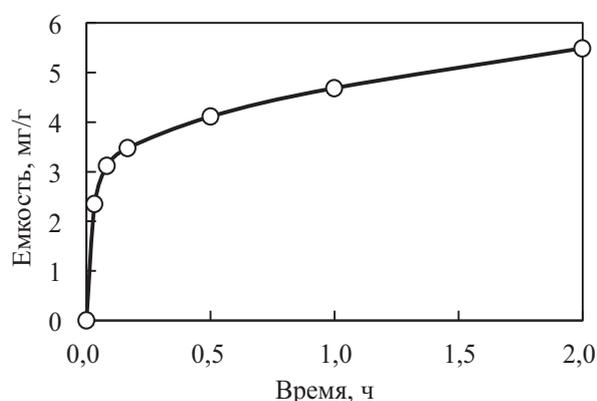


Рис. 7. Зависимость емкости сорбента от продолжительности контакта с рассолом

Fig. 7. Dependence of sorbent capacity on duration of contact with brine

Ресурсные испытания показали, что на протяжении ста циклов сорбции и десорбции емкость сорбента в среднем удерживается на уровне 5,6 мг/г (рис. 8).

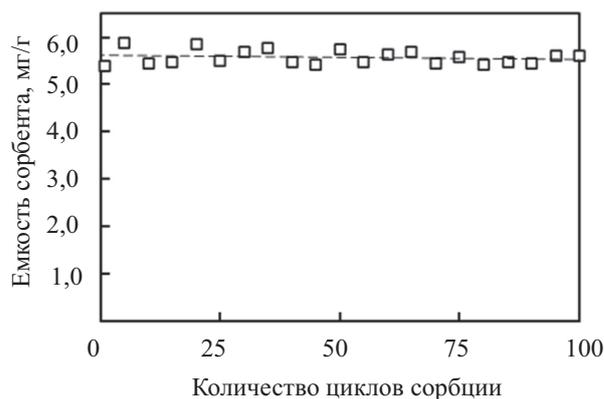


Рис. 8. Изменение емкости сорбента в зависимости от количества циклов сорбции и десорбции лития

Fig. 8. Sorbent capacity variation depending on the number of lithium adsorption and desorption cycles

Таким образом, ресурсные испытания показали, что сорбент на основе слоистого гидроксида алюминия-лития в сочетании со связующим из карбоксиметилцеллюлозы способен поглощать ионы лития из минерализованных рассолов, сохраняя при этом стабильность емкостных показателей на протяжении не менее 100 циклов сорбции/десорбции, что подтверждает его промышленный потенциал.

Анализ литиевого элюата методом ИСП-А-ЭС (табл. 4) показал, что соотношение $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/Li^{+}$ удалось снизить в 682 раза по сравнению с исходным рассолом. Высокая избирательность Al-Li СДГ сорбента к ионам лития в присутствии избытка конкурирующих катионов (Na^{+} , K^{+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) может быть объяснена особенностями дегидратации ионов в высокоминерализованной среде. Ионы Mg^{2+} , несмотря на меньшие размеры относительно ионов лития (Mg^{2+} : 0,72 Å, Li^{+} : 0,76 Å [28]), обладают высокой энерги-

Таблица 4. Элементный состав исходного рассола, промывных вод и элюата десорбции лития

Table 4. Elemental composition of the initial brine, wash water and lithium desorption eluate

Элемент	Содержание, г/дм ³		
	Исходный рассол	Промывные воды (2,0 КО)	Элюат (6,0 КО)
Li ⁺	0,24	0,73	0,41
Na ⁺	30,59	15,25	0,02
K ⁺	12,8	6,36	0,01
Ca ²⁺	64,93	31,99	0,16
Mg ²⁺	10,86	5,34	0,03
BO ₃ ³⁻	1,2	0,87	0,10
Ключевые технологические соотношения			
Mg ²⁺ /Li ⁺	45,2	7,36	0,07
Ca ²⁺ /Li ⁺	270,5	44,07	0,39
(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)/Li ⁺	315,8	51,44	0,46

ей гидратации (Mg^{2+} : -1898 кДж/моль, Li^+ : -506 кДж/моль [29]), что препятствует удалению их гидратных оболочек и внедрению в структуру сорбента. При этом для ионов Li^+ дегидратация энергетически более выгодна в условиях высокой ионной силы рассола. Одновалентные ионы Na^+ и K^+ , хотя и дегидратируются легче (энергия гидратации -391 и -308 кДж/моль, соответственно [29]), не способны занимать позиции Li^+ в слоевом пространстве Al-Li СДГ из-за высокого различия размеров ионных радиусов (Na^+ : $1,02$ Å, K^+ : $1,38$ Å против $0,76$ Å у Li^+ [28]). Таким образом, комбинация термодинамических (энергия гидратации) и структурных (размер иона) факторов обеспечивает избирательность сорбента исключительно к ионам Li^+ .

Полученные результаты демонстрируют высокую селективность к ионам лития сорбента на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития, использование которого позволяет решить проблему испарительной технологии извлекать литий из рассолов с критически высоким содержанием ионов кальция и магния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований сорбции лития из подземного минерализованного рассола была подтверждена возможность извлекать литий с использованием литий-селективного сорбента на основе слоистого двойного

гидроксида алюминия-лития. Был синтезирован литий-селективный сорбент с использованием органического связующего – карбоксиметилцеллюлозы. Были изучены свойства сорбента, его емкость по литию и получены данные по сорбции лития в статических и динамических условиях при различной удельной скорости потока. Было показано, что сорбент обладает полной динамической обменной емкостью по литию на уровне $5,7$ мг/г и может быть использован для извлечения лития из высокоминерализованных рассолов. Проведенные эксперименты показали, что использование данного сорбента позволяет извлекать литий с достаточно высоким показателем извлечения (до 95%) для исследуемого рассола с концентрацией лития на уровне 240 мг/дм³ при общем содержании солей 321 г/дм³. Ресурсные испытания показали, что синтезированный Al-Li-СДГ сорбент способен стабильно поглощать ионы лития на протяжении не менее ста циклов сорбции с сохранением первоначальных емкостных показателей.

Анализ фракции литиевого элюата ($6,0$ КО) демонстрирует высокую селективность Al-Li-СДГ сорбента, в частности соотношение $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/Li^+$ удалось снизить в 682 раза с $315,8$ в исходном рассоле до $0,46$ в литиевом элюате, что существенно повышает рентабельность дальнейшего выделения лития из элюата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцев П.Г. Литий: мировые запасы и перспективы применения // Альтернативная энергетика и экология. 2016. No. 1-2. P. 107–108. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>. EDN: YSQEVV.
2. Malhi G.S., Tanius M., Das P., Coulston C.M., Berk M. Potential mechanisms of action of lithium in bipolar disorder // Current understanding. 2013. Vol. 27. Iss. 2. P. 135–153. <https://doi.org/10.1007/s40263-013-0039-0>. EDN: RICABV.
3. Zarone F., Ruggiero G., Leone R., Breschi L., Leuci S., Sorrentino R. Zirconia-reinforced lithium silicate (ZLS) mechanical and biological properties: a literature review // Journal of Dentistry. 2021. Vol. 109. P. 103661. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103661>. EDN: INSAAT.
4. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминийлитиевые сплавы для самолетостроения // Металлург. 2012. № 5. P. 31–35. EDN: OZKXPR.
5. Petrescu F.I.T., Apicella A., Petrescu R.V.V., Kozaitis S.P., Bucinell R.B., Aversa R., Abu-Lebdeh T.M. Environmental protection through nuclear energy // American Journal of Applied Sciences. 2016. Vol. 13. Iss. 9. P. 941–946. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.941.946>.
6. Donahue C.J. Lubricating grease: a chemical primer // Journal of chemical education. 2006. Vol. 83. Iss. 6. P. 862. <https://doi.org/10.1021/ed083p862>.
7. Ebensperger A., Maxwell P., Moscoso C. The lithium industry: its recent evolution and future prospects // Resources Policy. 2005. Vol. 30. Iss. 3. P. 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2005.09.001>.
8. Султанова А.Г., Мичурин С.В. Некоторые вопросы геохимии лития и его распределение в рифейских породах Южного Урала // Геологический вестник. 2024. № 2. С. 65–80. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2024-2-6>. EDN: COOISR.
9. Xu Wenhua, He Lihua, Zhao Zhongwei. Lithium extraction from high Mg/Li brine via electrochemical intercalation/de-intercalation system using $LiMn_2O_4$ materials // Desalination. 2021. Vol. 503. P. 114935. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114935>. EDN: CLOYGN.

10. Миронов Ю.Б., Карпунин А.М., Фукс В.З. Эпохи формирования и типы месторождений лития зарубежных стран // Региональная геология и металлогения. 2022. № 92. С. 105–116. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_92_105-116. EDN: QCEVYK.
11. Tadesse B., Makuei F., Albijanic B., Dyer L. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: a review // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>. EDN: DRPKWM.
12. Саркаров Р.А., Белан С.И., Гусейнов Н.М. Оценка современного состояния и перспективы добычи лития и его соединений в России // Индустриальная экономика. 2022. № 1-2. С. 57–68. https://doi.org/10.47576/2712-7559_2022_2_1_57. EDN: ASXGDV.
13. Wang Jing, Koenig Jr.G.M. Direct lithium extraction using intercalation materials // Chemistry–A European Journal. 2024. Vol. 30. Iss. 4. P. e202302776. <https://doi.org/10.1002/chem.202302776>. EDN: QCJNUW.
14. Hochstetter C. Untersuchung über die Zusammensetzung einiger Mineralien // Journal für Praktische Chemie. 1842. Vol. 27. Iss. 1. P. 375–378. <https://doi.org/10.1002/prac.18420270156>.
15. Serna C.J., Rendon J.L., Iglesias J.E. Crystal-chemical study of layered $[Al_2Li(OH)_6]X \cdot nH_2O$ // Clays and Clay Minerals. 1982. Vol. 30. Iss. 3. P. 180–184. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1982.0300303>. EDN: ARHFUU.
16. Капустин А.Е. Неорганические аниониты // Успехи химии. 1991. Т. 60. № 12. С. 2685–2717. <https://doi.org/10.1070/RC1991v060n12ABEH001155>.
17. Li Jun, Luo Qinglong, Dong Mingzhe, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian. Synthesis of granulated Li/Al-LDHs adsorbent and application for recovery of Li from synthetic and real saltlake brines // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 209. P. 105828. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105828>. EDN: JBIJCU.
18. Luo Qinglong, Mingzhe Dong, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian, Li Jun. Extraction of lithium from salt lake brines by granulated adsorbents // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 628. P. 127256. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127256>. EDN: UCJREX.
19. Paranthaman M.P., Li Ling, Luo Jiaqi, Hoke T., Ucar H., Moyer B.A., et al. Recovery of lithium from geothermal brine with lithium–aluminum layered double hydroxide chloride sorbents // Environmental Science and Technology. 2017. Vol. 51. Iss. 22. P. 13481–13486. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03464>. EDN: YKBOAA.
20. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Lithium recovery from ultrahigh Mg^{2+}/Li^+ ratio brine using a novel granulated Li/Al-LDHs adsorbent // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 256. P. 117780. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117780>. EDN: DYMNHS.
21. Wu Lili, Li Ling, Evans S.F., Eskander T.A., Moyer B.A., Hu Zhichao, et al. Lithium aluminum-layered double hydroxide chlorides (LDH): formation enthalpies and energetics for lithium ion capture // Journal of the American Ceramic Society. 2019. Vol. 102. Iss. 5. P. 2398–2404. <https://doi.org/10.1111/jace.16150>.
22. Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzeres L.T. Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions // Studies in surface science and catalysis. 1999. Vol. 120A. P. 621–652. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(99)80567-9). EDN: LFMMWH.
23. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Li^+ adsorption performance and mechanism using lithium/aluminum layered double hydroxides in low grade brines // Desalination. 2021. Vol. 505. P. 114983. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114983>. EDN: VTOMNU.
24. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Effects of excessive lithium deintercalation on Li^+ adsorption performance and structural stability of lithium/aluminum layered double hydroxides // Journal of Colloid and Interface Science. 2020. Vol. 572. P. 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.081>. EDN: BHEWSW.
25. Li Dongdong, Zhang Ning, Gao Dandan, Zhuang Ziyu, Zeng Dewen. Phase chemistry for hydration sensitive (de) intercalation of lithium aluminum layered double hydroxide chlorides // ACS Materials Au. 2023. Vol. 4. Iss. 1. P. 45–54. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00063>. EDN: UOSSQO.
26. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С., Трифионов Н.С., Серебряков Е.В., Павлов С.С. [и др.]. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>. EDN: XSUIEX.
27. Вольдман Г.М. Основы экстракционных и ионообменных процессов в металлургии. М.: Металлургия, 1983. 376 с.
28. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // Foundations of Crystallography. 1976. Vol. A32. Iss. 5. P. 751–767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.
29. Schmid R., Miah A.M., Sapunov V.N. A new table of the thermodynamic quantities of ionic hydration: values and some applications (enthalpy–entropy compensation and Born radii) // Physical Chemistry Chemical Physics. 2000. Vol. 2. Iss. 1. P. 97–102. <https://doi.org/10.1039/a907160a>. EDN: LFXEX.

References

1. Kudryavtsev P.G. Lithium: Global reserves and application prospects. *Alternative Energy and Ecology*. 2016;1-2:107-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>. EDN: YSQEVV.
2. Malhi G.S., Tanious M., Das P., Coulston C.M., Berk M. Potential mechanisms of action of lithium in bipolar disorder. *Current understanding*. 2013;27(2):135-153. <https://doi.org/10.1007/s40263-013-0039-0>. EDN: RICABV.
3. Zarone F., Ruggiero G., Leone R., Breschi L., Leuci S., Sorrentino R. Zirconia-reinforced lithium silicate (ZLS) mechanical and biological properties: a literature review. *Journal of Dentistry*. 2021;109:103661. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103661>. EDN: INSAAT.

4. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Mikhaylov E.D. Aluminum-lithium alloys for aircraft building. *Metallurg.* 2012;31-35. (In Russ.). EDN: OZKXPR.
5. Petrescu F.I.T., Apicella A., Petrescu R.V.V., Kozaitis S.P., Bucinell R.B., Aversa R., Abu-Lebdeh T.M. Environmental protection through nuclear energy. *American Journal of Applied Sciences.* 2016;13(9):941-946. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.941.946>.
6. Donahue C.J. Lubricating grease: a chemical primer. *Journal of chemical education.* 2006;83(6):862. <https://doi.org/10.1021/ed083p862>.
7. Ebensperger A., Maxwell P., Moscoso C. The lithium industry: Its recent evolution and future prospects. *Resources Policy.* 2005;30(3):218-231. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2005.09.001>.
8. Sultanova A.G., Michurin S.V. Some issues of lithium geochemistry and its distribution in Rifhean rocks of the Southern Urals. *Geologicheskii vestnik.* 2024;2:65-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2024-2-6>. EDN: COOISR.
9. Xu Wenhua, He Lihua, Zhao Zhongwei. Lithium extraction from high Mg/Li brine via electrochemical intercalation/de-intercalation system using LiMn_2O_4 materials. *Desalination.* 2021;503:114935. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114935>. EDN: CLOYGN.
10. Mironov Yu.B., Karpunin A.M., Fuks V.Z. Formation epochs and types of lithium deposits in foreign countries. *Regional geology and metallogeny.* 2022;92:105-116. (In Russ.). https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_92_105-116. EDN: QCEVYK.
11. Tadesse B., Makuei F., Albijanic 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>. EDN: DRPKWM.
12. Sarkarov R.A., Belan S.I., Guseinov N.M. Assessment of the current state and prospects for the production of lithium and its compounds in Russia. *Industrial Economics.* 2022;1-2:57-68. (In Russ.). https://doi.org/10.47576/2712-7559_2022_2_1_57. EDN: ASXGDV.
13. Wang Jing, Koenig Jr.G.M. Direct lithium extraction using intercalation materials. *Chemistry–A European Journal.* 2024;30(4):e202302776. <https://doi.org/10.1002/chem.202302776>. EDN: QCJNUW.
14. Hochstetter C. Untersuchung über die Zusammensetzung einiger Mineralien. *Journal für Praktische Chemie.* 1842;27(1):375-378. <https://doi.org/10.1002/prac.18420270156>.
15. Serna C.J., Rendon J.L., Iglesias J.E. Crystal-chemical study of layered $[\text{Al}_2\text{Li}(\text{OH})_6]\text{X}\cdot n\text{H}_2\text{O}$. *Clays and Clay Minerals.* 1982;30(3):180-184. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1982.0300303>. EDN: ARHFUU.
16. Kapustin A.E. Inorganic anion exchangers. *Russian Chemical Reviews.* 1991;60(12):2685–2717. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC1991v060n12ABEH001155>.
17. Li Jun, Luo Qinglong, Dong Mingzhe, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian. Synthesis of granulated Li/Al-LDHs adsorbent and application for recovery of Li from synthetic and real saltlake brines. *Hydrometallurgy.* 2022;209:105828. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105828>. EDN: JBIJCU.
18. Luo Qinglong, Mingzhe Dong, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian, Li Jun. Extraction of lithium from salt lake brines by granulated adsorbents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2021;628:127256. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127256>. EDN: UCJREX.
19. Paranthaman M.P., Li Ling, Luo Jiaqi, Hoke T., Ucar H., Moyer B.A., et al. Recovery of lithium from geothermal brine with lithium–aluminum layered double hydroxide chloride sorbents. *Environmental Science and Technology.* 2017;51(22):13481-13486. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03464>. EDN: YKBOAA.
20. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Lithium recovery from ultrahigh $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ ratio brine using a novel granulated Li/Al-LDHs adsorbent. *Separation and Purification Technology.* 2021;256:117780. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117780>. EDN: DYMNHS.
21. Wu Lili, Li Ling, Evans S.F., Eskander T.A., Moyer B.A., Hu Zhichao, et al. Lithium aluminum-layered double hydroxide chlorides (LDH): formation enthalpies and energetics for lithium ion capture. *Journal of the American Ceramic Society.* 2019;102(5):2398-2404. <https://doi.org/10.1111/jace.16150>.
22. Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzeres L.T. Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions. *Studies in surface science and catalysis.* 1999;120A:621-652. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(99)80567-9). EDN: LFMMWH.
23. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Li^+ adsorption performance and mechanism using lithium/aluminum layered double hydroxides in low grade brines. *Desalination.* 2021;505:114983. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114983>. EDN: VTOMNU.
24. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Effects of excessive lithium deintercalation on Li^+ adsorption performance and structural stability of lithium/aluminum layered double hydroxides. *Journal of Colloid and Interface Science.* 2020;572:107-113. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.081>. EDN: BHEWSW.
25. Li Dongdong, Zhang Ning, Gao Dandan, Zhuang Ziyu, Zeng Dewen. Phase chemistry for hydration sensitive (de) intercalation of lithium aluminum layered double hydroxide chlorides. *ACS Materials Au.* 2023;4(1):45-54. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00063>. EDN: UOSSQO.
26. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Gladkov A.S., Trifonov N.S., Serebryakov E.V., Pavlov S.S., et al. Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe. *Geodynamics and Tectonophysics.* 2018;9(4):1235-1253. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>. EDN: XSUIEX.
27. Voldman G.M. *Fundamentals of extraction and ion-exchange processes in metallurgy.* Moscow: Metallurgy; 1983, 376 p. (In Russ.).

28. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Foundations of Crystallography*. 1976;A32(5):751-767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.

29. Schmid R., Miah A.M., Sapunov V.N. A new table of the thermodynamic quantities of ionic hydration: values and some applications (enthalpy–entropy compensation and Born radii). *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2000;2(1):97-102. <https://doi.org/10.1039/a907160a>. EDN: LFXEX.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алейников Сергей Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
✉ saaleynikov@yandex.ru
<http://orcid.org/0009-0001-7589-7049>

Белоусова Наталья Викторовна,
д.х.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
netmamba@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1355-7399>

Заявленный вклад авторов

Алейников С.А. определял цель работы, проводил эксперименты, проводил ИСП-АЭС анализы, писал статью. Белоусова Н.В. определяла цель работы, участвовала в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 03.08.2025 г.; принята к публикации 17.08.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Aleynikov,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ saaleynikov@yandex.ru
<http://orcid.org/0009-0001-7589-7049>

Natalia V. Belousova,
Dr. Sci. (Chem.), Professor,
Head of the Non-Ferrous
Metals Metallurgy Department,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
netmamba@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1355-7399>

Authors' contribution

Sergey A. Aleynikov determined the purpose of the work, conducted experiments, carried out inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) analyses, wrote the article. Natalia V. Belousova determined the purpose of the work, participated in the discussion of results and preparation of the article for publication.

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 21.06.2025; approved after reviewing 03.08.2025; accepted for publication 17.08.2025.