



«УТВЕРЖДАЮ»
Первый проректор
РТУ МИРЭА

Н.И. Прокопов

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет"

на диссертационную работу

Фуреева Ильи Леонидовича

на тему:

«Разработка технологии получения карбоната лития из высококарбонатных литиевых слюдястых руд», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.6.2. – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Актуальность темы диссертации

Диссертационное исследование Фуреева И.Л. направлено на разрешение актуальной научно-технической задачи — разработки эффективной технологии переработки бедных высококарбонатных литиевых руд, которые на сегодняшний день не используются в промышленных масштабах вследствие отсутствия экономически целесообразных и экологически безопасных методов. В условиях нарастающего дефицита лития и его соединений, а также учитывая отнесение лития к стратегическим видам минерального сырья (Распоряжение Правительства РФ № 2473-р), создание отечественного способа переработки нетрадиционных литиевых руд приобретает ключевое значение для обеспечения технологической независимости страны.

Значимость работы усиливается благодаря комплексному решению: применению в роли сульфатизирующего реагента техногенного гипса (отхода химических производств), что позволяет одновременно утилизировать побочные продукты и сократить операционные затраты; внедрению стадии селективной сорбционной очистки на отечественном катионите; а также организации замкнутого водооборота и возможности переработки твердых остатков в цементной промышленности. Данный подход соответствует принципам «зеленой» металлургии и рационального природопользования.

Научная новизна исследований, полученных результатов и выводов

В результате выполнения диссертационной работы автором получены следующие новые научные результаты:

1. Выявлены зависимости степени сульфатизации литийсодержащей слюды от температуры спекания, тонины помола шихты и массового соотношения руда : гипс. Определено, что максимальное извлечение лития (95,25 %) достигается при температуре 950 °С, соотношении компонентов 1:0,3 и крупности частиц менее 100 мкм. Установлена роль образования труднорастворимого волластонита как фактора, снижающего выход лития, и определены технологические параметры, позволяющие минимизировать его негативное влияние.

2. Предложен и термодинамически обоснован механизм обратной сорбции лития на сульфокатионите марки Токем-160 в кислых средах. На основе рассчитанных констант ионного обмена ($K_{ex}(Fe) \approx 10$, $K_{ex}(Al) \approx 5$, $K_{ex}(Li) \approx 0,01$) и коэффициентов распределения подтверждена высокая селективность процесса по отношению к многозарядным примесным катионам. Это позволило сконцентрировать литий с 0,622 до 7,64 г/л при степени извлечения более 99 %.

3. Рассчитаны термодинамические характеристики (ΔG° , константы равновесия) и кинетические параметры стадий сульфатизирующего обжига и сорбционной очистки, которые могут быть использованы при математическом моделировании и оптимизации технологических схем промышленного уровня.

Практическая значимость полученных результатов

Результаты диссертационной работы обладают высокой практической значимостью, что обосновано их апробацией и внедрением:

1. Предложена технологическая схема переработки высококарбонатных литиевых слюдястых руд, включающая стадии сульфатизирующего обжига с гипсом, водного выщелачивания, обратной сорбционной очистки на катионите Токем-160 и осаждения карбоната лития кальцинированной содой. Качество полученного продукта соответствует требованиям ТУ 6-09-3728, предъявляемым к марке «ХЧ».

2. На способ селективного извлечения лития сорбционным методом выдан патент РФ № 2842445 (дата регистрации – 26.06.2025).

3. В АО «Гиредмет» утверждена и введена в действие технологическая инструкция ТИ 02-358554791-2025; по результатам опытно-промышленных испытаний подтверждена стабильность технологических показателей и достигнуто сквозное извлечение лития на уровне около 95 %.

4. Отличительной особенностью разработанной технологии является возможность использования техногенного гипса и утилизации твердых остатков выщелачивания в производстве портландцемента, что определяет ее экологическую и экономическую привлекательность.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертационной работе научные и практические результаты следует рекомендовать к использованию. Рекомендации, предложенные в диссертационном исследовании, будут способствовать повышению технико-экономических показателей предприятий.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Сформулированные в диссертации научные положения и выводы базируются на применении современных методов химического и физико-химического анализа, значительном объеме выполненных экспериментальных исследований, математической обработке полученных данных, а также результатах опытно-промышленных испытаний. Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечиваются корректной статистической обработкой экспериментальных данных и использованием обширного парка современного аналитического оборудования.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертационная работа Фуреева И.Л. в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Она включает все необходимые разделы

согласно установленным ВАК нормам и состоит из пяти глав, в которых представлены итоги последовательных и взаимосвязанных изысканий.

Структура работы логически отражает ход исследования: от анализа сырьевой базы и существующих методов (глава 1) через детальное изучение вещественного состава руды (главы 2, 3) к экспериментальной отработке ключевых переделов – сульфатизирующему обжигу (глава 4) и гидрометаллургической переработке продуктивных растворов с сорбционным концентрированием лития (глава 5). Такое построение обеспечивает стройность изложения и позволяет поэтапно обосновать каждое из принимаемых технологических решений. Выводы, завершающие работу, сформулированы в строгом соответствии с поставленными задачами, обобщают основные итоги и фиксируют достигнутые научные и практические результаты.

Во введении автором обоснована актуальность выбранной темы как с позиций ресурсной значимости лития и его стратегической роли для технологического суверенитета страны, так и с учетом технологических сложностей переработки высококарбонатных слюдистых руд, характеризующихся низким содержанием целевого компонента, высокой карбонатностью и тонким сростанием минералов. Четко сформулированы цель работы и конкретные задачи, решение которых необходимо для ее достижения. Отражены научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту. Такой подход позволяет сформировать целостное представление о направленности и содержании диссертационного исследования.

Первая глава представляет собой аналитический обзор опубликованных научных работ по теме исследования. В ней систематизированы и критически проанализированы сведения о состоянии мирового рынка лития, особенностях минерально-сырьевой базы, а также о существующих и перспективных технологиях переработки литийсодержащих руд. Особое внимание уделено анализу достоинств и недостатков различных методов вскрытия литиевого сырья – кислотного, хлорирующего обжига, спекания с известью и сульфатизирующего обжига. На основе проведенного анализа обоснована целесообразность применения метода сульфатизирующего обжига с использованием гипса, что определяет дальнейшее направление экспериментальных исследований и позволяет сформулировать конкретные задачи для их реализации.

Во второй главе приведены подробные сведения об исходных материалах, используемых в работе, включая характеристику технологической пробы руды Шавазсайского месторождения, а также реагентов и сорбентов, применявшихся в экспериментах. Представлен перечень современных физико-химических методов исследования, которые были использованы для изучения вещественного состава, технологических свойств сырья и контроля продуктов переработки. Среди них: атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП), рентгенофазовый анализ (РФА), ИК-Фурье спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом (СЭМ-ЭДА), лазерная дифрактометрия и оптико-геометрический анализ. Описаны подходы к статистической обработке экспериментальных данных, обеспечивающие достоверность получаемых результатов. Здесь же представлены химическая и минеральная характеристики руды Шавазсайского месторождения, что создает основу для последующего обоснования технологических решений.

Третья глава посвящена детальному минералогическому изучению руды. На основе комплекса аналитических методов, включая оптическую микроскопию в проходящем и отраженном свете, сканирующую электронную микроскопию с энергодисперсионным анализом, а также количественную обработку цифровых

изображений с помощью оптико-геометрического анализатора «Минерал С7», установлены вещественный состав, морфология и характер срастания литийсодержащей слюды. Последняя идентифицирована как Mg-полилитионит (или Li-F-алюмоселадонит) со средним содержанием Li_2O 6,46 %. Полученные данные позволили количественно оценить распределение литиевой минерализации по классам крупности и формам выделений. Показано, что около 88 % слюды образует тонкие (менее 10 мкм) вростки и сростки (25–75 %) в алюмосиликатной матрице и карбонатах, что делает руду практически необогатимой традиционными гравитационными и флотационными методами. Данный вывод служит ключевым обоснованием необходимости переработки всей рудной массы методом спекания без предварительного обогащения. Кроме того, в главе определена высокая карбонатность руды (около 35 %), представленная в основном железистым доломитом, что подтверждает выбор сульфатизирующего обжига как основного метода вскрытия.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальной отработки процесса сульфатизирующего обжига. Исследовано влияние ряда технологических параметров на эффективность извлечения лития: тип сульфатизирующего агента (сульфаты алюминия, магния, натрия, калия, а также гипс), температура и продолжительность обжига, тонина помола шихты, соотношение руда : гипс. Экспериментально обосновано преимущество использования гипса (отхода Алмалыкского химического завода) в качестве сульфатизирующей добавки, что обеспечивает не только технологическую, но и экономическую эффективность, а также способствует решению проблемы утилизации техногенных отходов. Определены оптимальные параметры спекания: температура 950 °С, соотношение руда : гипс = 1 : 0,3, продолжительность 2 часа, помол до крупности менее 100 мкм. При этих условиях достигается извлечение лития в раствор до 95,25 %. Показано, что повышение температуры выше 950 °С или увеличение доли гипса приводит к снижению извлечения за счет образования нерастворимых силикатов (воластонита), блокирующих доступ выщелачивающего агента. С помощью термодинамического моделирования и термического анализа (TGA/DTA) подтвержден механизм протекающих реакций, включающий дегидратацию гипса, разложение карбонатов и образование растворимого сульфата лития, что придает работе дополнительную теоретическую обоснованность.

Пятая глава посвящена гидрометаллургической переработке продуктивных литийсодержащих растворов, полученных после выщелачивания спека. В ней обоснована и экспериментально подтверждена эффективность метода обратной сорбции, заключающегося в селективном удалении примесных многозарядных катионов (Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) на сульфокатионите Токем-160 в Li-форме при одновременном вытеснении лития в раствор. Изучены термодинамические и кинетические закономерности процесса ионного обмена; определены константы равновесия ($K_{\text{ex}}(\text{Fe}) \approx 10$, $K_{\text{ex}}(\text{Al}) \approx 5$, $K_{\text{ex}}(\text{Li}) \approx 0,01$) и коэффициенты распределения, что позволило количественно описать механизм процесса. Построены изотермы сорбции (Генри, Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича), подтверждающие монослойный характер ионного обмена и наличие неоднородных сорбционных центров. Определены оптимальные условия (рН 3,0–3,5, температура 20–30 °С), при которых достигается концентрирование лития с исходных 0,622 г/л до 7,64 г/л при степени извлечения более 99 %. Из очищенного и сконцентрированного раствора осаждением кальцинированной содой получен карбонат лития марки «ХЧ», полностью соответствующий требованиям ТУ 6-09-3728.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат отражает содержание диссертации, результаты которой достаточно полно отражены в научно-технических изданиях.

Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати

Результаты работы достаточно полно освещены в научных изданиях. По теме диссертации опубликовано 7 работ, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК и входящих в базы данных Scopus, Web of Science, 3 тезиса в сборниках трудов международных конференций и получен 1 патент РФ. Всего – 7 научных работ.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В тексте диссертации (страница 76) указано, что было испытано несколько технологических схем флотации (прямая селективная флотация и шесть вариантов реагентных режимов). Однако результатов по распределению лития по продуктам обогащения, полученным в результате испытаний указанных систем флотации диссертант не приводит в качестве подтверждения нецелесообразности обогащения рудного материала месторождения Шавазсай.
2. Раздел 4.2, таблица 3.9 представлены степени извлечения лития при различном соотношении руда: гипс и температура спекания, в том числе результаты спекания руды без сульфатизирующего агента в составе шихты. Степень извлечения лития в раствор в этом случае составила 29,19-30,13%. С чем связан переход лития в раствор при выщелачивании после термической обработки руды без сульфатизирующего агента?
3. Гидрометаллургические методы с использованием серной кислоты являются наиболее распространенными при промышленной переработке литийсодержащих соединений. На странице 27 диссертант указывает: «В настоящее время процессы извлечения лития из руд и концентратов с применением соляной и азотной кислот находятся на стадии лабораторных исследований». По какой причине принято решение о введении технологического ограничения на использование сернокислотного выщелачивания? Почему не исследовано солянокислое и азотнокислое выщелачивание?
4. В работе продемонстрировано, что применение сульфатизирующего обжига с использованием гипса обеспечивает извлечение лития на уровне 95 %. Изучалось ли влияние состава и свойств гипса как техногенного отхода (в частности, содержания примесных компонентов, влажности) на воспроизводимость технологических показателей? Какие требования должны предъявляться к качеству гипса для его использования в промышленной схеме?
5. При проработке сорбционной стадии значительное внимание уделено выбору типа сорбента и оптимизации технологических параметров. Какие аппаратные решения предполагается использовать для реализации процесса обратной сорбции в промышленных условиях (конструкция колонн, режим их функционирования, способы регенерации и организация противоточного движения фаз)?

Несмотря на вышеуказанные замечания, оценивая работу в целом, следует отметить важность и актуальность поставленной и успешно решенной задачи. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и содержит результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью.

Заключение

Диссертационная работа Фуреева Ильи Леонидовича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой успешно решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для развития отечественной металлургии редких металлов. В рамках исследования разработана эффективная, ресурсосберегающая и экологически безопасная технология получения карбоната лития из высококарбонатных литиевых слюдистых руд – нетрадиционного типа сырья, ранее не вовлекавшегося в промышленное производство. Предложенные в работе технологические решения отличаются комплексным подходом, сочетающим использование техногенного гипса в качестве сульфатизирующего агента, селективную сорбционную очистку на отечественном катионите, замкнутый водооборот и утилизацию твердых отходов в цементной промышленности, что обеспечивает высокую экономическую и экологическую эффективность разработанной схемы.

Выполненное исследование отличается высокой актуальностью, что обусловлено как возрастающим спросом на литий и его стратегической значимостью для обеспечения технологического суверенитета страны, так и отсутствием в настоящее время рентабельных технологий переработки бедных высококарбонатных литиевых руд. Полученные в работе результаты обладают несомненной научной новизной, которая заключается в установленных закономерностях процессов сульфатизирующего обжига с гипсом и обратной сорбционной очистки, а также в выявленных термодинамических и кинетических параметрах этих процессов. Практическая значимость работы подтверждена разработкой технологической схемы, получением патента и внедрением результатов в виде технологической инструкции, прошедшей опытно-промышленную апробацию.

Таким образом, диссертационная работа «Разработка технологии получения карбоната лития из высококарбонатных литиевых слюдистых руд», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» в НИТУ МИСИС, п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Фуреев Илья Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов».

Отзыв рассмотрен, обсужден и одобрен на научном семинаре (заседании) кафедры химии и технологии редких элементов им. К.А. Большакова Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет». На заседании присутствовало 11 чел. Результаты голосования: «за» - 11 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 3 от 31.03.2026 г.

Заведующий кафедрой химии и технологии редких элементов им. К.А. Большакова,
доктор технических наук (специальность 05.17.02), профессор



Дьяченко Александр Николаевич
тел. 8-909-540-68-63
e-mail: dyachenko@mirea.ru

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Юридический и фактический адрес: 119454, Москва, пр. Вернадского, 78

Телефон: +7 (499) 600-80-80, e-mail: rector@mirea.ru