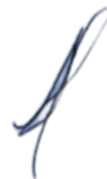


На правах рукописи



АЛЕЙНИКОВ Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПО ИЗВЛЕЧЕНИЮ ЛИТИЯ ИЗ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена
в федеральном государственном автономном образовательном учреждении
высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

- Научный руководитель:** **Белоусова Наталья Викторовна**
доктор химических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Тимофеев Константин Леонидович**
доктор технических наук,
АО «Уралэлектромедь»,
начальник технического отдела
Инженерно-производственного управления
(г. Верхняя Пышма)
- Филатова Елена Геннадьевна**
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
доцент кафедры «Химия и биотехнология
имени В.В. Тутуриной» (г. Иркутск)
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»
(г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «24» декабря 2026 г. в 10:00 ч на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» <https://www.istu.edu>.

Автореферат разослан «02» ноября 2026 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

Е-mail: vulix2011@yandex.ru

Тел./факс: (3952)40-51-17

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современный этап развития мировой экономики, характеризующийся стремительной трансформацией энергетики и транспорта, привел к резкому росту спроса на литий. В России эта тенденция усугубляется острым дефицитом литиевой продукции, которая практически полностью импортируется. Сложившаяся зависимость от внешних поставок создает прямые риски для технологической безопасности и конкурентоспособности отечественных высокотехнологичных предприятий.

Специфика российской сырьевой базы состоит в том, что запасы лития в ней сосредоточены в пластовых водах нефтегазовых месторождений, тогда как в странах-лидерах его добывают из рассолов соляных озер. Высокая обводненность нефтедобычи делает эти воды широкодоступным, но технологически сложным ресурсом, требующим разработки специализированных методов переработки. Параллельно с этим в стране ожидается накопление значительных объемов вторичного сырья – «черной массы» от отработавших литий-ионных аккумуляторов, переработка которого соответствует принципам циркулярной экономики и снижению экологической нагрузки.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью решения комплекса взаимосвязанных задач по преодолению импортозависимости, освоению специфических отечественных ресурсов и созданию технологий для их переработки. Наиболее перспективным методом для извлечения лития из таких многокомпонентных рассолов является сорбционная технология, позволяющая интегрировать процесс в существующий цикл нефтедобычи. При этом отсутствие в России опытно-промышленных технологий извлечения лития диктует необходимость разработки универсальных гидрометаллургических схем, адаптированных как для первичного, так и для вторичного сырья.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ и Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р) и Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р) в части создания новых высокоэффективных технологий переработки литийсодержащих рассолов и вторичного сырья («черной массы» литий-ионных аккумуляторов) для обеспечения технологического суверенитета и минерально-сырьевой безопасности Российской Федерации.

Степень разработанности темы исследования

Проблема извлечения лития из различных видов сырья находится в сфере интересов многих российских и зарубежных ученых.

В области сорбционного извлечения лития из рассолов и пластовых вод фундаментальный вклад внесли ученые J. Zhong, S. Lin, J. Yu (East China University of Science and Technology, China), Z. Yu, C. Hai (Unspecified Chinese research institution), А.Д. Рябцев, Н.П. Коцупало, Л.Т. Менжерес, В.П. Исупов, Л.Т. Ситникова, Е.В. Мамылова (ЗАО «Экостар-наутех»), Д.А. Кондруцкий, Г.Р. Гаджиев (АО «АРДМ»), Е.Г. Филатова, Е.В. Зелинская (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»), которые изучали данную проблему и разработали способы получения лития из различного вида минеральных источников.

Исследования, проводимые с участием А.Ш. Рамазанова, Д.А. Свешниковой, Д.Р. Атаева и др. в рамках проектов ПАО «Татнефть», ПАО «Газпром» и академических институтов, доказали принципиальную возможность и эффективность сорбцион-

ного извлечения лития из многокомпонентных рассолов с получением первичных литиевых концентратов. Однако существующие технологические схемы в значительной степени ориентированы на стадию обогащения и концентрирования и требуют дальнейшей разработки для получения товарного продукта, соответствующего рыночным стандартам.

В направлении переработки вторичного литиевого сырья значительные результаты были достигнуты специалистами в области гидрометаллургии. Работы М.А. Берсеновой, Е.В. Кириллова, С.В. Кириллова, Г.М. Бунькова, В.Н. Рычкова заложили основы кислотного и щелочного вскрытия «черной массы». Исследования К.Д. Наумова, С.А. Сапьянова, В.О. Кордик, Ю.В. Соколовой, выполненные в АО «Гиредмет» и НИТУ «МИСИС», были сфокусированы на комплексном извлечении никеля, кобальта и марганца. Работы К.Л. Тимофеева и Г.И. Мальцева, выполненные в АО «Уралэлектромедь», были направлены на сорбционное извлечение тяжелых металлов из многокомпонентных растворов. Несмотря на это, литий в существующих технологических схемах часто остается попутным компонентом, а процессы его глубокой очистки до товарных продуктов, таких как карбонат лития, не получили достаточной проработки. Это приводит к низкой рентабельности переработки и вынужденному накоплению отходов.

Цель и задачи работы

Целью работы является разработка научно-обоснованных технологических решений получения карбоната лития из первичного (пластовые воды) и вторичного («черная масса» отработанных литий-ионных аккумуляторов) сырья с использованием сорбционных процессов.

Задачи исследования:

- анализ современного состояния получения литиевых продуктов из природного и техногенного сырья;
- изучение процесса сорбции лития из пластового рассола в статических и динамических условиях;
- синтез литийселективного сорбента для сорбции лития из высокоминерализованного рассола;
- изучение процесса выщелачивания лития из «черной массы» отработанных литий-ионных аккумуляторов (ЛИА);
- выбор сорбционных материалов для ионообменной очистки литиевого концентрата;
- разработка технологических и аппаратурных схем производства карбоната лития из первичного и вторичного сырья;
- выбор коррозионно-устойчивых материалов для аппаратов производственной линии;
- расчет экономических показателей эффективности проекта получения карбоната лития из первичного сырья.

Научная новизна работы

1. Установлено влияние связующего из класса полисахаридов (альгинат натрия) и его производного (карбоксиметилцеллюлоза) при синтезе гранулированного литийселективного сорбента (на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития) на достижение высоких механических свойств сорбента.

2. Установлены кинетические закономерности сорбции лития в условиях высокоминерализованной пластовой воды литийселективным сорбентом (на основе двой-

ного слоистого гидроксида алюминия-лития), отвечающие модели псевдовторого порядка (модели Еловича).

3. Установлено, что процесс водного выщелачивания лития из «черной массы» является высокоселективным и отвечает кинетической модели Еловича.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Получены новые фундаментальные данные о кинетике и механизмах сорбционного извлечения лития из сложных многокомпонентных рассолов и растворов водного выщелачивания лития из техногенного сырья. Результаты дополняют теорию гидрометаллургических процессов редких металлов и могут быть использованы при моделировании аналогичных систем.

2. Разработаны и научно обоснованы технические решения гидрометаллургического получения карбоната лития из «черной массы» отработанных литий-ионных аккумуляторов и пластовой воды Кембрийского водоносного горизонта.

3. Разработаны аппаратурно-технологические схемы производственных процессов для обоих видов сырья с расчетом материальных балансов и подбором коррозионно-стойких материалов.

4. Выполнена комплексная оценка технико-экономической эффективности проекта получения карбоната лития из пластовой воды Кембрийского водоносного горизонта производительностью по рассолу 100 м³/ч с расчетом капитальных (1,424 млрд руб.) и операционных затрат (665 тыс. руб./т Li₂CO₃), а также ключевых показателей инвестиционной привлекательности проекта (чистый дисконтированный доход, индекс доходности, дисконтированный срок окупаемости, внутренняя норма доходности).

5. Получен акт внедрения от АО «Аксион – Редкие и Драгоценные Металлы», подтверждающий использование результатов диссертации в реальной технологической разработке предприятия.

Методы исследования

Для решения поставленных задач был использован комплекс физико-химических методов анализа: атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП), рентгенофазовый анализ (РФА), флуориметрия, методы химического анализа (аргентометрическое и ацидиметрическое титрование).

Обработку результатов экспериментов проводили с использованием методов математического анализа и статистической обработки результатов в программе MS Excel.

Положения, выносимые на защиту

1. Научно обоснованная и экспериментально подтвержденная гидрометаллургическая технология получения технического карбоната лития из пластовой воды Кембрийского водоносного горизонта, обеспечивающая получение продукта с содержанием основного вещества не менее 99,5 % и сквозного извлечения лития на уровне 93 %.

2. Научно обоснованная и экспериментально подтвержденная гидрометаллургическая технология получения технического карбоната лития из «черной массы» литий-ионных аккумуляторов, основанная на селективном водном выщелачивании с применением ПАВ (лаурилсульфат натрия) и окислителя (гипохлорит кальция) и обеспечивающая получение продукта с содержанием основного вещества не менее 95,6 % и извлечением лития на уровне 71,6 %.

3. Результаты исследования сорбции лития из многокомпонентных рассолов синтезированным гранулированным сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития (Al-Li-СДГ) с полисахаридным связующим, демонстрирующие

его высокую селективность (снижение соотношения $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{Li}^{+}$ в элюате в 682 раза), динамическую обменную емкость 3,1 г/дм³ и стабильность в течение не менее 100 циклов сорбция-десорбция.

4. Результаты коррозионных испытаний конструкционных материалов, обосновывающие применение полипропилена для аппаратов, работающих в высокоминерализованных средах при ~25 °С, и нержавеющей сталей марок AISI 316 и SAF 2507 для высокотемпературных стадий (выпаривание, осаждение, сушка) в агрессивных средах (горячие концентрированные растворы LiCl и Li₂CO₃).

5. Разработанные технологические схемы и материальные балансы получения карбоната лития из пластовой воды и «черной массы» ЛИА, а также оценка экономических показателей проекта переработки пластовой воды, доказавшая его промышленную перспективность.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов исследования обусловлена их соответствием литературным данным и ранее полученным результатам в области переработки литиевого сырья, а также доказана с позиции теории гидрометаллургических процессов. Достоверность обеспечивается применением современных инструментальных методов анализа и сертифицированного оборудования, а также достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований.

Апробация работы

Основные положения работы были представлены на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный – 2023» и «Перспектив Свободный – 2024» (Красноярск, 2023, 2024), XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств» (Иркутск, 2024), двенадцатом Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы-2024» (Красноярск, 2024).

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, анализе существующих методов переработки литийсодержащих ресурсов, разработке методики проведения экспериментов, обработке экспериментальных результатов, обобщении результатов экспериментальных исследований и их анализе, подготовке научных статей для публикаций и материалов докладов для участия в конференциях.

Публикации

Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 12 научных статьях, из них 4 статьи – в изданиях, определенных Перечнем ВАК РФ, 1 – в журнале, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus; имеется 2 патента РФ на изобретение.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 163 наименования. Диссертация изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 72 таблицы; имеется 9 приложений.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.х.н., профессору, заведующей кафедрой металлургии цветных металлов Института цветных металлов Сибирского федерального университета Белоусовой Наталье Викторовне, а также коллективам АО «Аксион – Редкие и Драгоценные Металлы» и АО «Красцветмет».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен литературный обзор, посвященный сырьевым источникам литья и современным технологиям его извлечения. Дана информация о мировых и российских запасах первичного сырья, включая рудное и гидроминеральное (рассолы, пластовые воды). Показано, что несмотря на наличие в России разведанных месторождений литиевых руд, наиболее перспективным сырьем являются попутные пластовые воды нефтедобычи, характеризующиеся широким диапазоном содержания литья ($5\text{--}500\text{ мг/дм}^3$) и высокой общей минерализацией. Отмечена ключевая особенность российских пластовых вод – высокое отношение концентраций щелочноземельных металлов (Ca, Mg) к литию (показатель R), что существенно осложняет их переработку по сравнению с зарубежными аналогами.

Проведен анализ вторичных ресурсов литья, основным источником которых являются отработанные литий-ионные аккумуляторы. Рассмотрены состав, структура и причины деградации ЛИА, обоснован прогнозируемый рост объемов их выхода из употребления. Проанализированы существующие технологии переработки ЛИА, показано, что пирометаллургические методы приводят к значительным потерям литья, в связи с чем наибольший интерес представляют гидрометаллургические подходы.

Систематизированы и критически оценены технологии извлечения литья как из гидроминерального, так и из вторичного сырья. Особое внимание уделено современным методам прямого извлечения литья, среди которых наиболее проработанной, экономически целесообразной и применимой для российских пластовых вод признана сорбционная технология с использованием слоистого двойного гидроксида алюминия-лития. На основе проведенного анализа сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, направленные на разработку эффективной гидрометаллургической технологии получения карбоната литья из двух типов сырья.

Во **второй главе** диссертации изложена детальная методическая основа исследования, включающая характеристику объектов исследования, применяемых материалов, реактивов, оборудования и методик проведения экспериментов.

Первичное сырье – пластовая вода Кембрийского водоносного горизонта – характеризуется содержанием литья $0,24\text{ г/дм}^3$, высокой общей минерализацией ($\sim 321\text{ г/дм}^3$), значительными концентрациями кальция ($64,93\text{ г/дм}^3$) и магния ($10,86\text{ г/дм}^3$), а также нефтепродуктов ($7,1\text{ мг/дм}^3$).

Вторичное литиевое сырье представлено «черной массой» отработанных литий-ионных аккумуляторов, полученной их механическим измельчением и рассевом. Ее фазовый (таблица 1) и элементный (таблица 2) составы определены методами РФА и АЭС-ИСП, соответственно.

Для выщелачивания «черной массы» использовали минеральные кислоты (HCl , H_2SO_4 , HNO_3 , HClO_4), окислитель $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ и восстановители (H_2O_2 , $\text{N}_2\text{H}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$). Модельные растворы, имитирующие литиевые концентраты и растворы выщелачивания, готовили растворением соединений литья, хлоридов щелочных, щелочноземельных металлов, хлорида алюминия, а также борной кислоты.

Синтез литий-селективного сорбента проводили с использованием полиалюминийхлорида, гидроксида литья, альгината натрия и карбоксиметилцеллюлозы. Для ионообменной очистки применяли коммерческие аниониты (Purolite A500, АН 31, Diaion CRB05) и катиониты (Diaion CR11, Purolite S950). Удаление нефтепродуктов

осуществляли с помощью сорбентов АС и МС, диатомита DIAMIX Aqua, активированного угля МАУ-200 и каталитической загрузки МФУ.

Таблица 1 – Фазовый состав «черной массы» отработанных ЛИА

№ карточки в PDF	Формула	Минерал	Содержание, % масс.
00-041-1478	C	Graphite-2H	64
01-075-0626	MnO	Manganosite	4
01-077-0199	Cu ₂ O	Cuprite	3
01-077-7455	Co	Cobalt	14
01-083-1454	Li ₂ CO ₃	Zabuyelite	10
01-070-3038	Cu	Copper	4
01-070-7950	Li(Fe _{0.16} Mn _{1.77})O ₄	Lithium Iron Manganese Oxide	1

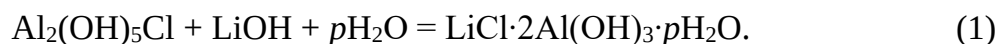
Таблица 2 – Содержание основных элементов в «черной массе» ЛИА по результатам АЭС-ИСП

Содержание, % масс.								
Ti	Mn	Cu	Fe	Ni	Al	P	Li	Co
0,08	7,48	2,47	0,87	9,72	3,39	0,68	3,15	14,97

Сорбционные исследования проводили в динамических (с использованием ионообменных колонн) и статических условиях. Анализ растворов выполняли методами АЭС-ИСП (спектрометр iCAP 7400) и флуориметрии. Фазовый состав и термические свойства материалов изучали методами РФА (дифрактометр Empyrean) и синхронного ТГА/ДСК (анализатор STA 449 F3).

Методика экспериментов включала: изучение кинетики водного выщелачивания «черной массы» ЛИА при температурах 25 и 80 °С, а также различных соотношениях Ж:Т; сорбционные исследования в статических и динамических условиях с расчетом статической (СОЕ), динамической (ДОЕ), полной динамической (ПДОЕ) и рабочей (РЕ) обменных емкостей, а также коэффициентов распределения и избирательности.

Разработана методика синтеза гранулированного литий-селективного сорбента на основе двойного гидроксида алюминия-лития (Al-Li-СДГ). В основе синтеза лежит реакция осаждения смешанного гидроксида алюминия-лития:



В качестве связующего вещества использовали соединения из класса полисахаридов и их производных: альгинат натрия и карбоксиметилцеллюлозу. Для определения типа и оптимального количества связующего проводили серию экспериментов по синтезу литий-селективного сорбента, в которых количество вводимого связующего варьировали от 0,5 до 12 % от массы полиалюминийхлорида. Приведены методики оценки основных физико-механических свойств синтезированного сорбента: механической прочности (истираемости и измельчаемости) и набухаемости.

Представлена методика снятия и обработки кинетических кривых для процессов сорбции лития из пластовой воды и выщелачивания лития из «черной массы» ЛИА. Аппроксимация экспериментальных данных выполнена с использованием моделей псевдопервого (PFO) и псевдвторого (PSO) порядков, модели Еловича и модели Аврами, а для выявления лимитирующей стадии массопереноса при сорбции дополнительно применены модели Вебера-Морриса и Бойда. Обработка выполнена методами линеаризации и нелинейной регрессии с использованием информационных критериев Акаике (AICc) и Байеса (BIC).

Для получения изотермы сорбции лития приведена методика ее построения и аппроксимации моделями Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радushкевича и Тёмкина методами линеаризации и нелинейной регрессии.

Согласно методике очистки пластовой воды от нефти, для удаления нефтепродуктов из литийсодержащего рассола использовали 4 колонки ИОК ВЗОР 30/24/220 объемом 100 см³, каждую из которых наполняли водой и на 90 % различной фильтрующей загрузкой. Через каждую колонку с фильтрующей загрузкой поочередно пропускали нефтесодержащий рассол в течение 30 мин нисходящим потоком со скоростью 4,5 дм³/ч, что соответствует линейной скорости потока 10 м/ч. Исходный рассол и фракции очищенного от нефтепродуктов рассола анализировали на содержание нефтепродуктов методом флуориметрии. Эффективность удаления нефтепродуктов фильтрующим материалом оценивали по извлечению.

В конце главы дана оценка точности определения лития в растворах и сопутствующих элементов методом ИСП-АЭС, которая показывает, что относительная погрешность (δ) определения лития составляет 0,98–1,75 % ($P = 0,95$), а для сопутствующих элементов – не более 4 %. Влияние матричного эффекта на точность определения лития не выявлено, что подтверждает надежность методики.

В третьей главе представлены результаты экспериментальной апробации технологических решений по переработке «черной массы» литий-ионных аккумуляторов с целью получения технического карбоната лития.

Исследование начато со сравнительного анализа кислотного и водного выщелачивания, который показал, что вода обеспечивает высокоселективное извлечение лития из «черной массы» литий-ионных аккумуляторов при минимальном переходе в раствор примесных элементов (Ni, Co, Mn) по сравнению с азотной кислотой (таблица 3). В связи с этим для дальнейших исследований выбран метод водного выщелачивания.

Таблица 3 – Результаты АЭС-ИСП анализа растворов выщелачивания «черной массы» ЛИА

Растворитель	Концентрация, мг/дм ³								
	Ti	Mn	Cu	Fe	Ni	Al	P	Li	Co
0,5M HNO ₃	1,7	649,8	214,2	64,5	962,9	337,3	57,3	334,6	1518,7
H ₂ O	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,1	0,4	20,9	3,8	218,4	0,9

Полученные данные свидетельствуют о том, что водное выщелачивание позволяет селективно извлекать литий из «черной массы» без значительного загрязнения раствора ионами переходных металлов, что существенно упрощает последующие стадии очистки литиевого концентрата.

Установлено, что степень извлечения лития напрямую зависит от соотношения Ж:Т, достигая 72,5 % при Ж:Т $\approx$ 200 (рисунок 1, а), а кинетические исследования подтвердили, что процесс выщелачивания лития активно идет в первые 20 мин и слабо зависит от температуры (рисунок 1, б).

По результатам обработки кинетических кривых линейный анализ показал наибольшую детерминацию у модели псевдвторого порядка, однако более точный нелинейный регрессионный анализ показал, что среди кинетических моделей PFO, PSO, Еловича и Аврама наилучшее согласие с экспериментальными данными обеспечивает модель Еловича (таблица 4), а величина рассчитанной энергии активации составила 31,8 кДж/моль, что характерно для смешанного контроля.

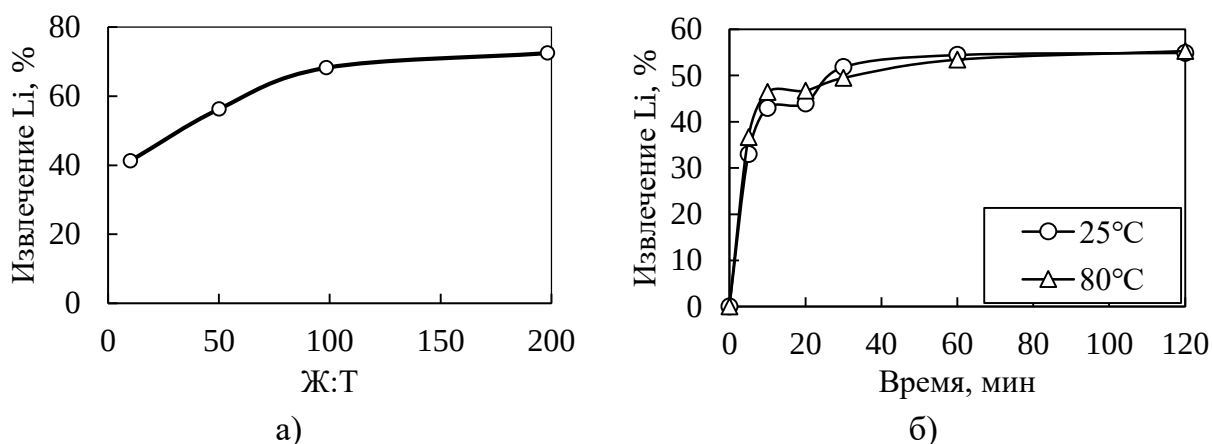


Рисунок 1 – Зависимость: а) – извлечения лития от соотношения Ж:Т при водном выщелачивании «черной массы» ЛИА; б) – извлечения лития от времени выщелачивания лития из «черной массы» ЛИА при температуре 25 и 80 °C

Таблица 4 – Результаты обработки кинетических кривых выщелачивания лития из «черной массы» ЛИА методами линейного анализа и нелинейной регрессии

Модель	Линейный анализ		Нелинейная регрессия			
	Q_e расч., мг/г	R^2	Q_e расч., мг/г	SSE	AIC	BIC
При температуре 25 °C						
PFO	9,3	0,9741	16,0	5,0	10,0	3,2
PSO	18,3	0,9969	15,0	20,9	17,1	10,4
Еловича	17,4	0,9291	17,4	2,0	5,5	-1,3
Аврами	17,6	0,9202	16,7	3,6	8,3	1,5
При температуре 80 °C						
PFO	5,5	0,9438	15,8	2,1	5,7	-1,1
PSO	17,5	0,9986	15,0	11,7	14,2	7,5
Еловича	17,4	0,8907	17,4	1,7	4,5	-2,3
Аврами	17,6	0,8767	16,6	2,1	5,6	-1,2

На рисунке 2 представлено сравнение экспериментальных кинетических кривых с расчетными, полученными после нелинейной оптимизации параметров моделей PFO, PSO, Еловича и Аврами. Видно, что при обеих температурах модели PFO и PSO дают завышение извлечения лития в начальный период процесса и занижение данного показателя в области равновесия. При этом кинетические кривые для моделей Еловича и Аврами близки к экспериментальным значениям на всем временном интервале.

Применимость модели Еловича свидетельствует о том, что процесс выщелачивания лития протекает на гетерогенной энергетически неоднородной поверхности «черной массы». Выщелачивание лития лимитируется стадией химической реакции на границе раздела фаз с экспоненциальным замедлением скорости по мере истощения доступных позиций лития.

Низкое извлечение лития объясняется значением pH (10,7–11,1), способствующим частичному осаждению лития в форме двойного гидроксида алюминия-лития, гидрофобностью графита и сорбционной активностью некоторых шпинелей.

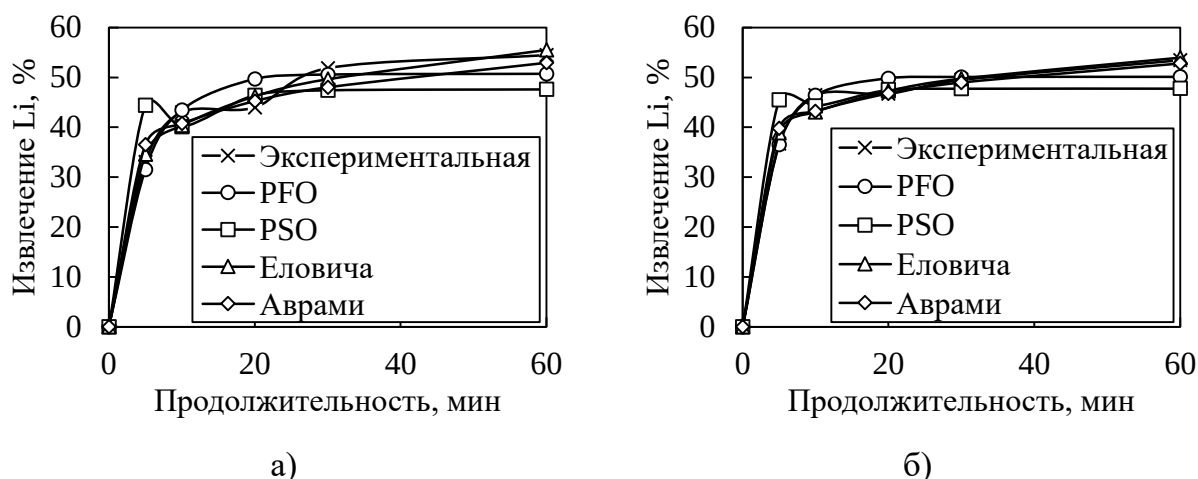


Рисунок 2 – Кинетические кривые водного выщелачивания лития из «черной массы» ЛИА моделей псевдопервого порядка (PFO), псевдвторого порядка (PSO), Еловича и Аврами после нелинейного регрессионного анализа в сравнении с экспериментальной кривой: а) – при температуре 25 °С; б) – при температуре 80 °С

Для очистки раствора выщелачивания от ключевой примеси (алюминия) исследована сорбция на слабоосновных и сильноосновных анионитах. В динамических условиях на CRB05 определена ДОЕ, которая составила 2,47 г/дм³ при удельной скорости потока 2 колоночных объема в час (КО/ч), рисунок 3 (УН – удельная нагрузка).

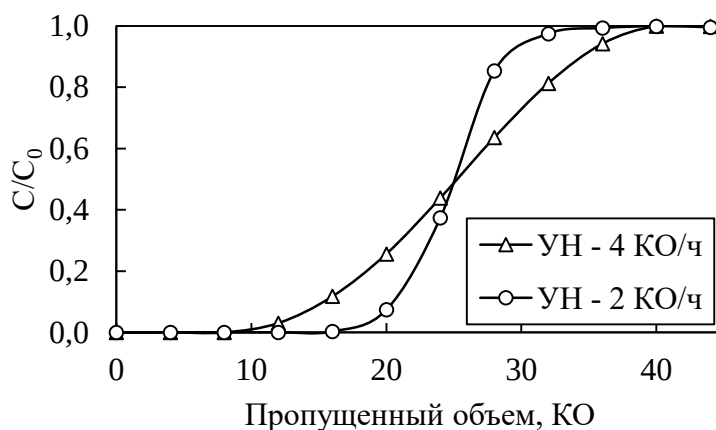


Рисунок 3 – Выходные кривые сорбции алюминия на CRB05

Проведена комплексная очистка реального раствора выщелачивания (Ж:Т = 10) на последовательно соединенных колоннах с анионитом CRB05 и хелатным катионитом Purolite S950 (в Li-форме). В результате достигнуто полное удаление алюминия и значительное снижение концентраций Ca, Mg, Fe, Ni при сохранении концентрации лития.

Очищенный раствор сконцентрирован упариванием, после чего осажден карбонат лития барботированием CO₂. Данные РФА-анализа подтвердили образование целевого продукта. Согласно проведенному анализу, содержание основного вещества составило 98,2 % (таблица 5), однако выявлено повышенное содержание примеси алюминия (0,089 %). Прямое извлечение лития от «черной массы» до карбоната в этом варианте составило 41,2 %.

Дальнейшее извлечение лития из «черной массы» путем водного выщелачивания даже при соотношении Ж:Т = 100:1 оказалось неэффективным (не более 13 %), при

этом водное выщелачивание с ПАВ (лаурилсульфат натрия) и окислителем ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) позволило увеличить суммарное извлечение лития до 71,6 %. Ионообменная очистка полученного раствора от ионов Ca на катионите S950 и последующее упаривание с осаждением NaCl позволили получить литиевый концентрат, из которого был осажден карбонат лития с долей основного вещества 95,6 % (см. таблицу 5).

Таблица 5 – Результат химического анализа карбоната лития, полученного из «черной массы» отработанных ЛИА

Элемент	Содержание, %		Метод анализа
	Водное выщелачивание	Выщелачивание с ПАВ и окислителем	
Li_2CO_3	98,2	95,6	Ацидиметрия
Ti	0,0170	0,0004	АЭС-ИСП
Ca	0,0204	0,0226	АЭС-ИСП
Mn	0,0006	Не обн.	АЭС-ИСП
Cu	Не обн.	Не обн.	АЭС-ИСП
Fe	0,0053	0,0254	АЭС-ИСП
Ni	Не обн.	Не обн.	АЭС-ИСП
Al	0,0888	0,0211	АЭС-ИСП
Mg	0,0146	0,0340	АЭС-ИСП
Na	0,0111	0,3160	АЭС-ИСП
P	0,0304	0,1380	АЭС-ИСП
K	0,0105	0,0094	АЭС-ИСП
Co	Не обн.	Не обн.	АЭС-ИСП
B	0,0052	0,0020	АЭС-ИСП
S	0,0006	0,2534	АЭС-ИСП
H_2O	0,20	0,22	Гравиметрия

В четвертой главе описаны результаты лабораторной апробации технологии получения карбоната лития из пластовой воды Кембрийского водоносного горизонта. Начальным этапом являлась очистка рассола от нефтепродуктов, для которой наиболее эффективно показала себя диатомитовая фильтрующая загрузка DIAMIX Aqua, обеспечивающая снижение концентрации нефтепродуктов до уровня менее 0,5 мг/дм³ (таблица 6).

Таблица 6 – Результаты эксперимента по удалению нефтепродуктов из пластовой воды

Фильтрующая загрузка	Концентрация нефтепродуктов, мг/дм ³	Извлечение нефтепродуктов, %
АС/МС	1,54	78,28
DIAMIX Aqua	0,45	93,63
МФУ	1,42	79,97
МАУ-200	1,07	84,94
Исходный рассол	7,11	-

Для селективного извлечения лития был синтезирован сорбент на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития (Al-Li-СДГ) путем растворения в воде навески полиалюминийхлорида в присутствии карбоксиметилцеллюлозы и добавлении к полученной смеси при постоянном перемешивании и нагреве до 60 °С раствора гидроксида лития до достижения pH 8,5–9,5 с дальнейшим обезвоживанием экструзией и сушкой гранул. Свойства синтезированного сорбента представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Свойства синтезированного Al-Li-СДГ сорбента

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

График выходных кривых сорбции (рисунок 4, а) демонстрирует, что в динамических условиях синтезированный сорбент поглощает исключительно литий, пропускавая сопутствующие ионы натрия, калия, кальция, магния и бора без задержки. При удельной скорости потока 2 КО/ч динамическая обменная емкость составила 3,1 г/дм³, а извлечение лития достигло 97 % до остаточной концентрации 6,8 мг/дм³. Поскольку десорбция лития с Al-Li-СДГ осуществляется с помощью H₂O, стадия промывки сорбента между сорбцией и десорбцией отсутствует, поэтому отмывка сорбента от рассола идет одновременно с десорбцией лития (рисунок 4, б).

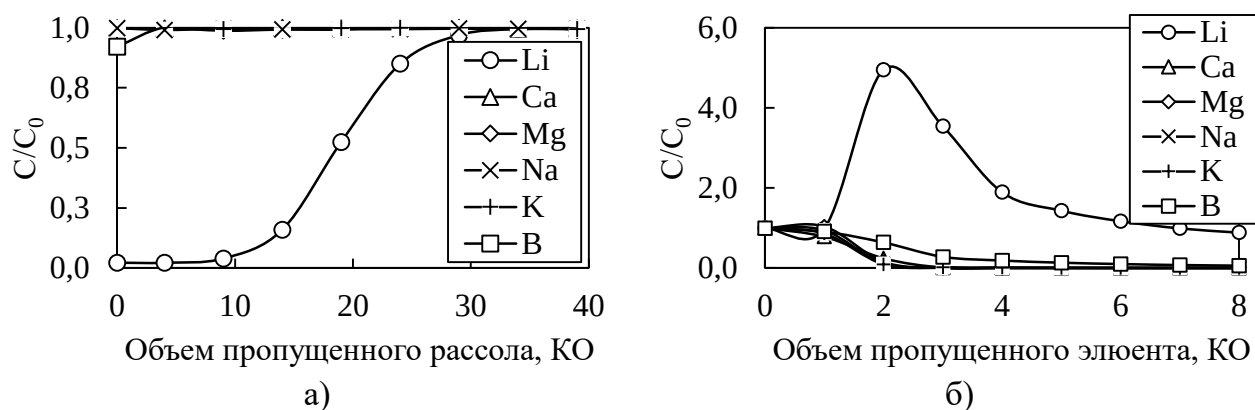


Рисунок 4 – Выходные кривые при удельной скорости потока 2 КО/ч:
а) – сорбции; б) – десорбции

В условиях статической сорбции лития были сняты кинетическая кривая сорбции лития (рисунок 5, а) и изотерма сорбции лития (рисунок 5, б).

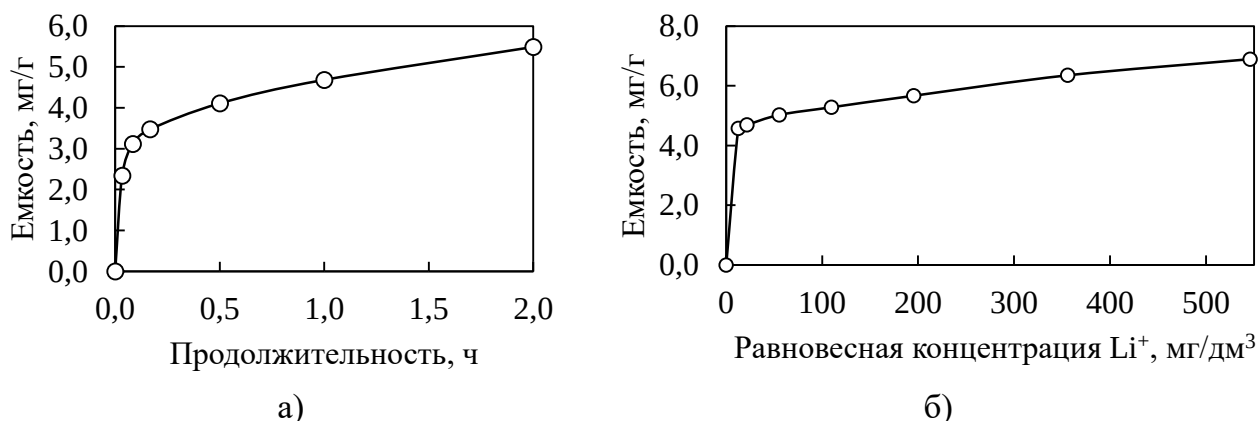


Рисунок 5 – Зависимость емкости Al-Li-СДГ сорбента: а) – от времени сорбции (кинетическая кривая); б) – от равновесной концентрации Li⁺ в растворе (изотерма)

Линейный анализ кинетической кривой с использованием линеаризованных моделей псевдопервого порядка, псевдвторого порядка и Еловича показал высокую степень детерминации для модели псевдвторого порядка ($R^2 = 0,9966$, рисунок 6, а) и модели Еловича ($R^2 = 0,9847$, рисунок 6, б).

Анализ данных в рамках модели Вебера-Морриса позволил выявить на графике $Q_t = f(\sqrt{t})$ два линейных участка с высокими коэффициентами детерминации (рис. 6, в). Первый участок соответствует стадии внешней диффузии, второй – внутренней, что указывает на смену лимитирующей стадии в процессе сорбции.

Анализ кинетических данных в рамках диффузионной модели Бойда (рисунок 6, г) показал удовлетворительную линейность зависимости Bt от t ($R^2 = 0,9751$), однако смещение прямой выше нулевой координаты свидетельствует о том, что процесс лимитируется не исключительно внутренней диффузией, а имеет более сложный характер.

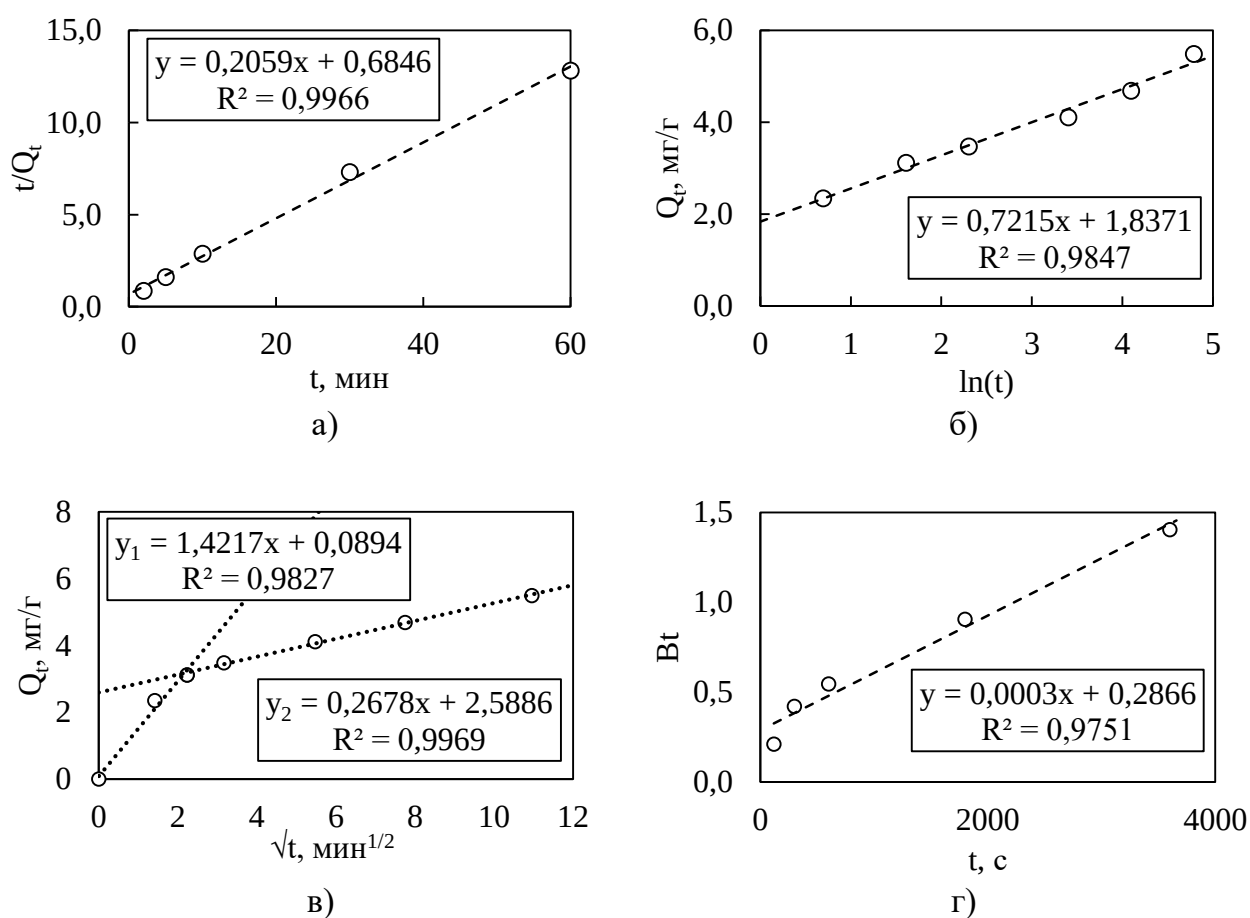


Рисунок 6 – Линеаризованные зависимости кинетических моделей: а) – псевдвторого порядка; б) – Еловича; в) – Вебера-Морриса; г) – Бойда

В результате нелинейной обработки кинетической кривой по наименьшему значению информационных критериев АІСс и ВІС (таблица 8) была выявлена предпочтительность модели Еловича, что указывает на то, что сорбция лития протекает на энергетически неоднородной поверхности сорбента. Наблюдаемое экспоненциальное замедление процесса обусловлено последовательным заполнением активных центров с различной энергией сорбции: первоначально занимают наиболее энергетически выгодные позиции, а по мере их заполнения процесс переходит на менее активные центры, что приводит к снижению скорости сорбции.

Таблица 8 – Результаты обработки кинетической кривой сорбции лития из пластовой воды методами линейного анализа и нелинейной регрессии

Модель	Линейный анализ		Нелинейная регрессия			
	Q_e расч., мг/г	R^2	Q_e расч., мг/г	SSE	AICc	BIC
PFO	2,8	0,9578	4,6	1,892	-2,16	-5,27
PSO	4,9	0,9966	4,7	1,506	-3,76	-6,87
Еловича	5,3	0,9847	5,3	0,096	-23,02	-26,13

По результатам линейного анализа изотермы сорбции, наилучшее описание экспериментальных данных обеспечивает модель Ленгмюра с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9939$ и модель Фрейндлиха с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9416$ (рисунок 7).

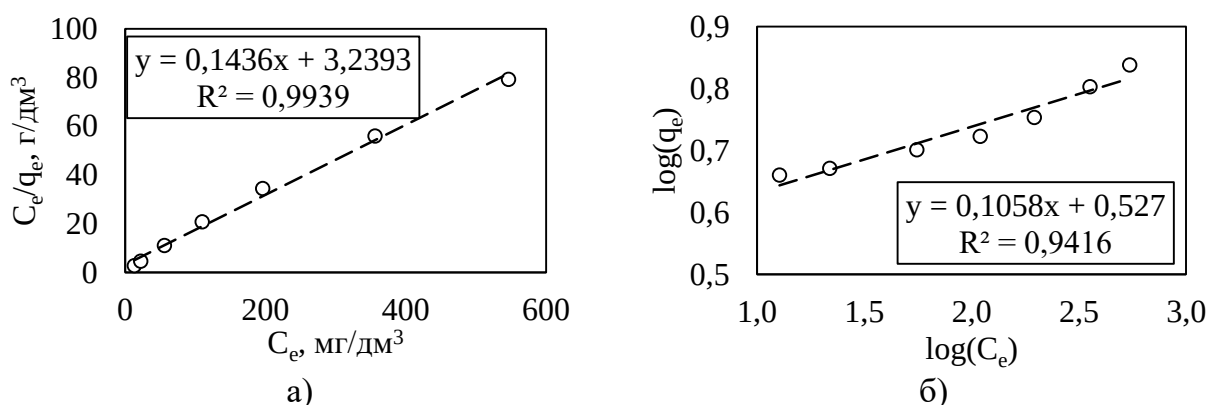


Рисунок 7 – Линеаризованные изотермы сорбции лития:
а) – Ленгмюра; б) – Фрейндлиха

В результате нелинейной обработки экспериментальной изотермы наилучшее описание экспериментальных данных обеспечивает модель Фрейндлиха, которая характеризуется наименьшими значениями информационных критериев AICc и BIC и минимальной ошибкой аппроксимации SSE (таблица 9).

Таблица 9 – Результаты обработки изотермы сорбции лития нелинейным регрессионным анализом

Модели	Линейный анализ	Нелинейная регрессия		
	R^2	SSE	AICc	BIC
Ленгмюра	0,9939	1,585	-3,397	-6,505
Фрейндлиха	0,9416	0,260	-16,050	-19,158
Дубинина-Радускевича	0,4507	2,574	-0,003	-3,112
Тёмкина	0,9130	0,389	-13,224	-16,332

Применимость модели Фрейндлиха подтверждает энергетическую неоднородность межслоевого пространства сорбента, где ионы лития интеркалируют в центры с различной энергией активации. Согласованность изотермической (модель Фрейндлиха) и кинетической (модель Еловича) моделей однозначно указывает на хемосорбционный механизм интеркаляции лития на гетерогенной поверхности. Это доказывает, что высокая селективность сорбента обеспечивается не только структурным соответствием (эффектом молекулярного сита), но и термодинамической выгодностью связывания Li^+ в дефектных участках слоистой структуры.

Ресурсные испытания в течение 100 циклов сорбции-десорбции показали, что ожидаемое снижение емкости за 1 цикл оценивается в 0,0018 мг/г (рисунок 8).



Рисунок 8 – Изменение емкости сорбента в зависимости от количества циклов сорбции и десорбции лития

В результате 13 циклов сорбции-десорбции был наработан литиевый элюат объемом 7,8 дм³. Анализ элюата показал, что соотношение $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{Li}^{+}$ было снижено в 682 раза по сравнению с исходным рассолом.

Исходя из анализа химического состава литиевого элюата, была проведена оценка избирательности Al-Li-СДГ сорбента, которая заключалась в расчете коэффициентов разделения D .

Как следует из полученных результатов (таблица 10), синтезированный сорбент Al-Li-СДГ демонстрирует исключительно высокую избирательность по отношению к ионам лития в присутствии конкурирующих катионов, что объясняется комбинацией термодинамических (различие в энергии гидратации ионов) и структурных (различие в ионных радиусах) факторов. Относительно низкий коэффициент разделения $D_{\text{Li,B}} = 2,3$ объясняется особенностями поведения бора в щелочной среде и способностью сорбента поглощать борсодержащие анионы.

Таблица 10 – Результат расчета коэффициентов разделения (элюат – рассол)

Коэффициенты разделения					
$D_{\text{Li,Li}}$	$D_{\text{Li,Na}}$	$D_{\text{Li,K}}$	$D_{\text{Li,Ca}}$	$D_{\text{Li,Mg}}$	$D_{\text{Li,B}}$
1,0	2508,4	2099,2	665,5	593,7	2,3

Для глубокой очистки элюата от примесей проведены исследования по сорбции кальция, магния и бора в статических условиях. Установлено, что хелатный аминофосфоновый катионит Purolite S950 обладает наибольшей емкостью по кальцию и магнию (0,70 моль/дм³) и большей селективностью к магнию по сравнению с иминодиацетатным катионитом Diaion CR11 (0,44 моль/дм³). Для удаления бора наиболее эффективным оказался слабоосновной анионит Diaion CRB05, статическая емкость которого составила 0,83 моль/дм³.

После концентрирования литиевого элюата упариванием до 9 г/дм³ была проведена ионообменная очистка в динамических условиях и использованием хелатного катионита Purolite S950 и слабоосновного анионита Diaion CRB05. Дальнейшее концентрирование полученного раствора упариванием позволило получить концентрат с содержанием лития 79,9 г/дм³. По мере концентрирования наблюдается осаждение хлорида натрия (рисунок 9), что позволило значительно сократить концентрацию ионов натрия до 0,4 г/дм³.

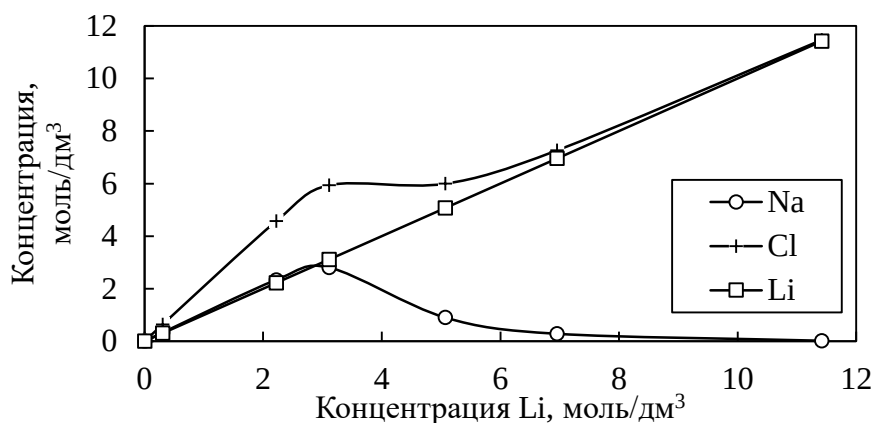


Рисунок 9 – Изменение мольной концентрации Li^+ , Na^+ и Cl^- при концентрировании литиевого концентрата

Осаждение карбоната лития из очищенного концентрата проводили 2 М раствором карбоната натрия при 90 °С. Химический анализ показал содержание основного вещества 99,56 % (таблица 11). Извлечение лития из концентрата в твердый продукт составило 93,2 %.

Таблица 11 – Результаты химического анализа карбоната лития, полученного из рассола

Элемент	Содержание, % масс.	Метод анализа
Li_2CO_3	99,560	Ацидиметрия
Ca	0,031	АЭС-ИСП
Fe	0,001	АЭС-ИСП
Al	0,004	АЭС-ИСП
Mg	0,006	АЭС-ИСП
Na	0,178	АЭС-ИСП
P	Не обн.	АЭС-ИСП
K	Не обн.	АЭС-ИСП
B	0,016	АЭС-ИСП
S	Не обн.	АЭС-ИСП
Cl	0,021	Аргентометрия
H_2O	0,180	Гравиметрия

В пятой главе представлены принципиальная технологическая (рисунок 10) и аппаратурно-технологическая схемы получения карбоната лития из пластовой воды на опытно-промышленной установке производительностью по рассолу 100 м³/ч (по карбонату лития 951 т/год).

Процесс получения карбоната лития включает стадии механической фильтрации, сорбции лития слоистым двойным гидроксидом, концентрирования элюата обратным осмосом, ионообменной очистки от примесей Ca, Mg и B, вакуумного выпаривания, осаждения карбоната лития, его отмывки и сушки.

На основе лабораторных данных выполнен расчет материального баланса.

Также применительно к процессу получения карбоната лития из «черной массы» литий-ионных аккумуляторов на опытно-промышленной установке в главе приведены принципиальная технологическая (рисунок 12) и аппаратурно-технологическая схемы.

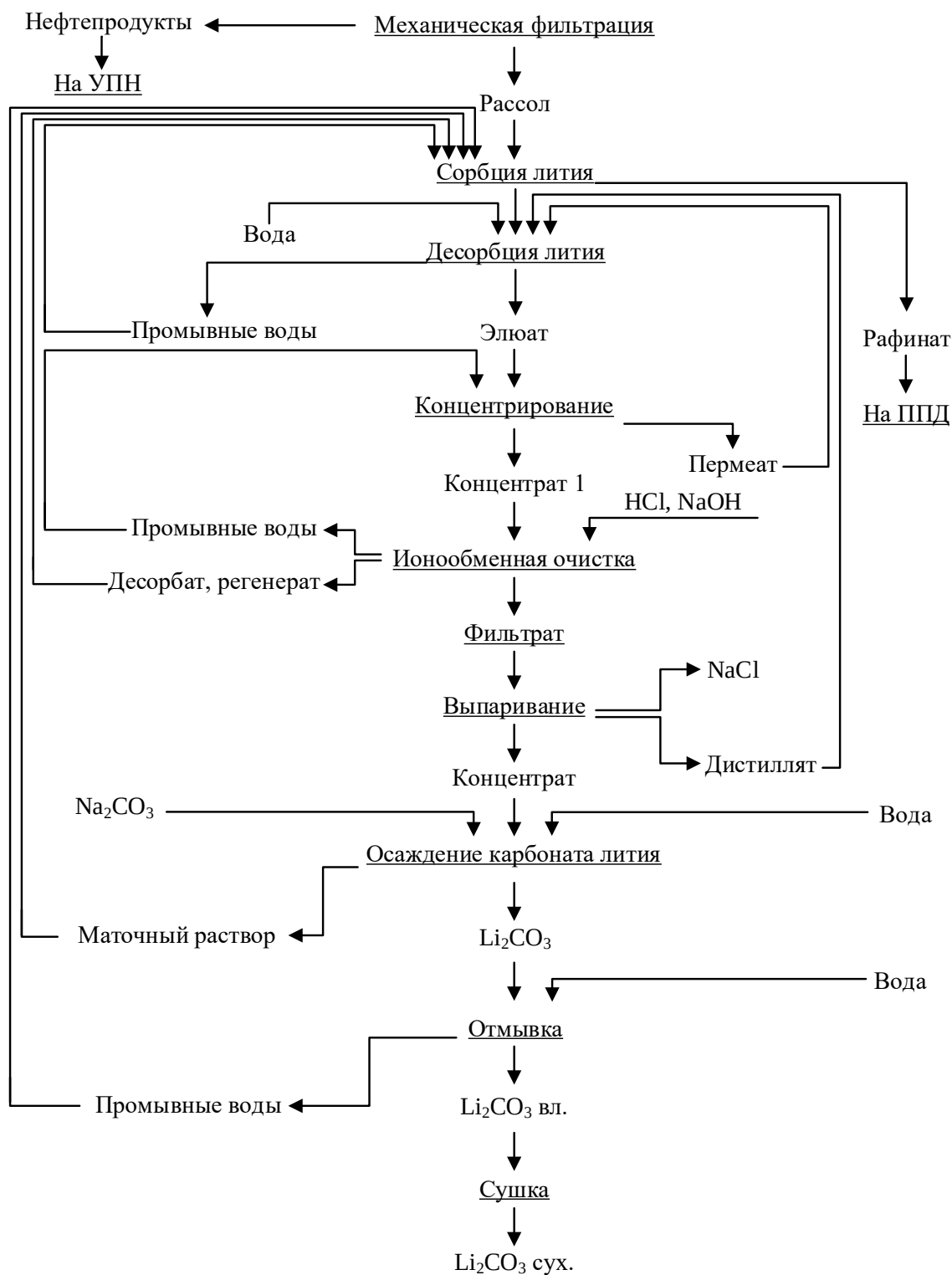


Рисунок 10 – Принципиальная технологическая схема получения карбоната лития из пластовой воды

Процесс получения карбоната лития включает стадии водного выщелачивания с окислителем ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) и ПАВ, вакуумного выпаривания, двухстадийной ионообменной очистки от примесей (Al, Ca, Mg, Fe, Ni), осаждения карбоната лития, переосаждения карбоната лития путем карбонизации и декарбонизации, отмывки и сушки карбоната лития. На основе лабораторных данных выполнен расчет материального баланса процесса.

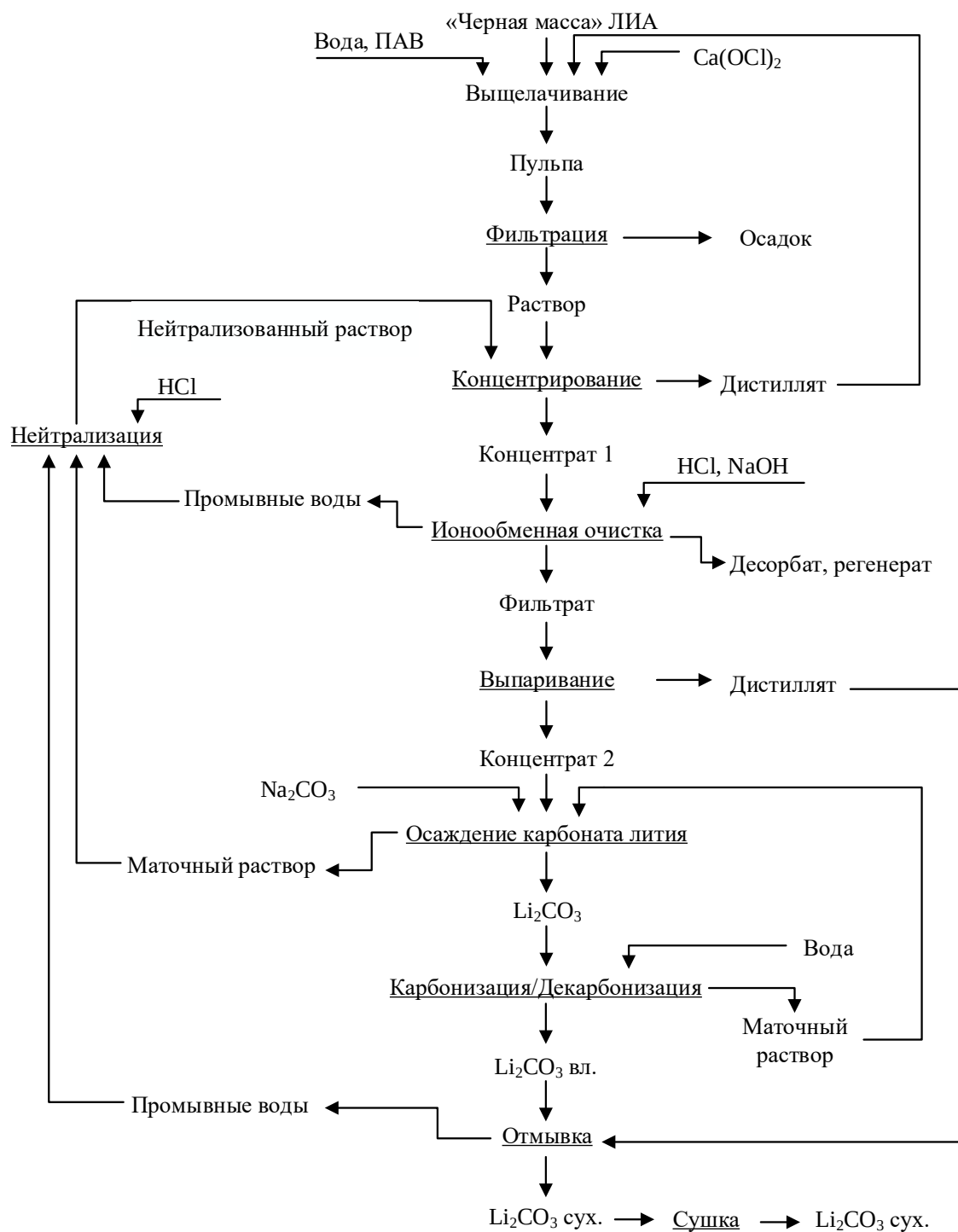


Рисунок 11 – Принципиальная технологическая схема получения карбоната лития из «черной массы» ЛИА

Проведены коррозионные испытания конструкционных материалов: для умеренных температур ($\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) рекомендован полипропилен, а для агрессивных сред (горячий концентрированный LiCl и раствор Li_2CO_3) оптимальными являются нержавеющей стали AISI 316 и SAF 2507 (таблица 12).

Разработан перечень основного оборудования, где для реакторов выщелачивания и емкостей рекомендован полипропилен, а для высокотемпературных стадий (выпаривание, осаждение, сушка) – сталь AISI 316.

Таблица 12 – Результаты оценки коррозионной устойчивости исследуемых материалов для раствора LiCl

№	Испытуемый материал	Δm , мг	Скорость коррозии (γ_{corr}), мм/год	Балл	Группа стойкости
Для раствора LiCl					
1	SAF 2507	0,20	0,0006	1	Совершенно стойкие
2	AISI 304	2,70	0,010	4	Стойкие
3	AISI 316	0,70	0,002	2	Весьма стойкие
Для раствора Li ₂ CO ₃					
4	SAF 2507	2,10	0,0052	3	Весьма стойкие
5	BT1-0	3,00	0,011	4	Стойкие
6	AISI 316	2,80	0,007	3	Весьма стойкие
7	AISI 304	2,40	0,008	3	Весьма стойкие

Проведена оценка экономической эффективности проекта производства карбоната лития из пластовой воды производительностью 951 т/год. Капитальные вложения в создание установки, включая стоимость сорбентов, основного оборудования и инфраструктуры, оценены в 1,424 млрд руб.

Расчет себестоимости показал, что ее величина составляет 665 тыс. руб./т, при этом в структуре себестоимости (рисунок 12) наибольшая доля затрат приходится на сырье и материалы (32,1 %), в частности, на ежегодную досыпку сорбента, которая составляет $\approx 15,7$ % в год, а также электроэнергию (27,3 %), в частности, на нагрев при упаривании литиевого концентрата; однако данный вид затрат может быть потенциально снижен за счет использования природного газа на нефтяных месторождениях вместо электроэнергии.

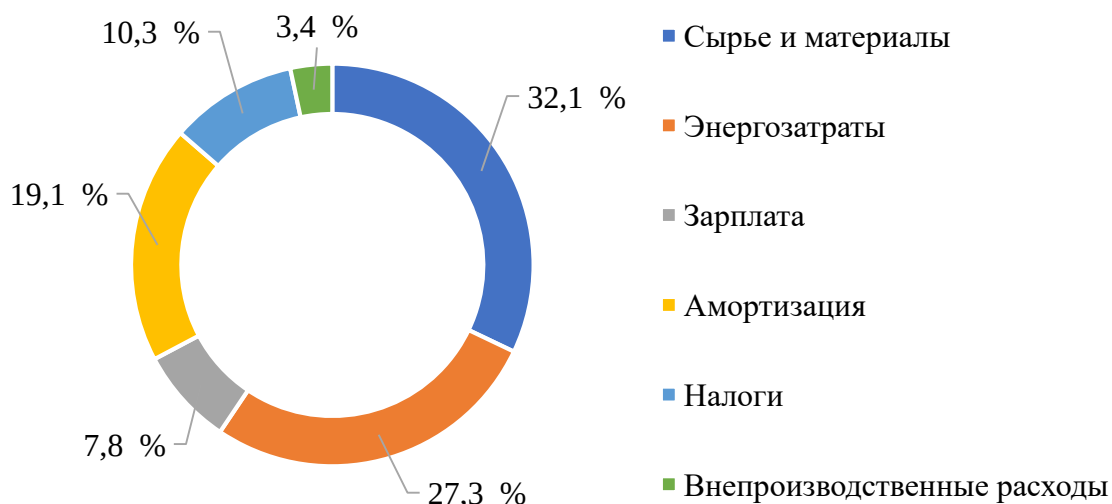


Рисунок 12 – Себестоимость производства карбоната лития из пластовой воды

По результатам расчета денежных потоков и дисконтирования (ставка дисконтирования 13 %) определены ключевые показатели эффективности: чистый дисконтированный доход (NPV) – 270,8 млн руб., индекс доходности (PI) – 1,19, внутренняя норма доходности (IRR) – 17,6 %, а дисконтированный срок окупаемости проекта – 7,4 года (рисунок 13).

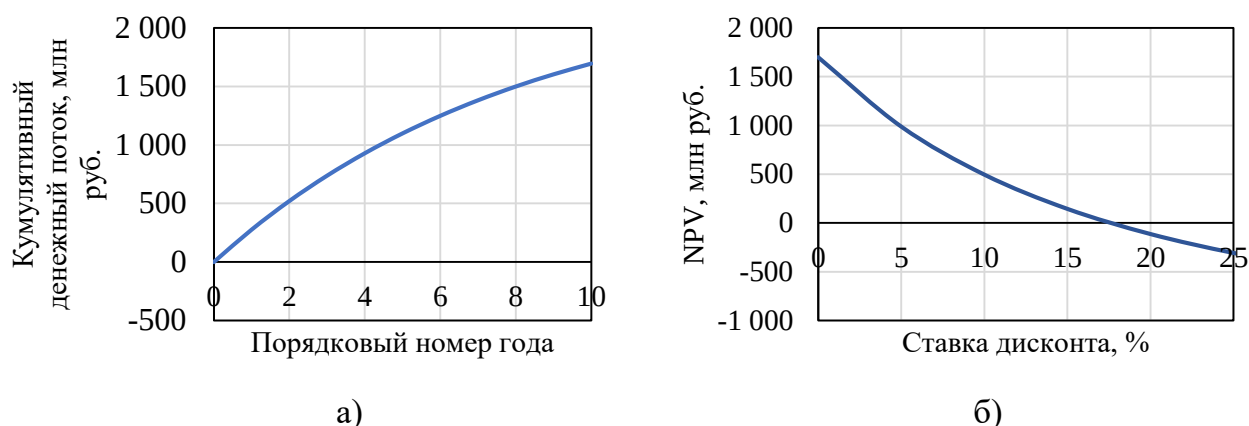


Рисунок 13 – График зависимости: а) – кумулятивного денежного потока от порядкового номера года; б) – NPV от ставки дисконтирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс исследований позволил достичь поставленной цели по разработке научно-обоснованных технологических решений получения карбоната лития из первичного (пластовые воды) и вторичного («черная масса») сырья с использованием сорбционных процессов.

1. Проведен анализ современного состояния получения литиевых продуктов из природного и техногенного сырья, который показал, что Россия обладает значительной сырьевой базой лития – как минеральной, так и гидроминеральной. Наиболее перспективным первичным источником лития в РФ являются пластовые воды нефтяных и газовых месторождений с содержанием Li от 5 до 500 мг/дм³ и общей минерализацией 50–500 г/дм³. Среди технологий прямого извлечения лития для российских гидроминеральных ресурсов наиболее адаптируемой является сорбция с использованием двойного гидроксида алюминия-лития. Вторичное литиевое сырье (отработанные литий-ионные аккумуляторы) становится все более значимым: доля Li в производстве аккумуляторов достигла 83 % (2022 г.), и к 2030 году ожидается пятикратный рост их количества. Показано, что пирометаллургические методы переработки ЛИА приводят к значительным потерям лития со шлаком, поэтому предпочтение отдается гидрометаллургическим технологиям. Ключевыми проблемами при переработке «черной массы» остаются: необходимость сортировки по типу катодного материала, удаление фтора и фосфора из электролита, а также регенерация графита и электролитных солей. В рассмотренных технологиях разделение Ni, Co, Mn часто не предусмотрено – выделяют их смешанные гидроксиды или сульфаты, что снижает ценность конечной продукции.

2. Изучен процесс сорбции лития из пластового рассола в статических и динамических условиях. При анализе кинетики в статических условиях определено время полунасыщения, равное 3 мин; установлено, что процесс описывается моделью Еловича, что указывает на хемосорбционный механизм на энергетически неоднородной поверхности. Моделирование изотерм показало наилучшее соответствие модели Фрейндлиха (параметр интенсивности $n = 8,925$), подтверждающее термодинамическую выгодность интеркаляции Li^+ . Максимальная экспериментальная емкость составила 6,89 мг/г при равновесной концентрации 546,0 мг/дм³. В динамических условиях подтверждена высокая избирательность сорбента по отношению к ионам лития (соотношение $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{Li}^+$ в элюате снижено в 682 раза относительно исходного рассола).

3. Синтезирован новый гранулированный литий-селективный сорбент на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития. Сорбент показал высокую рабочую емкость ($3,1 \text{ г/дм}^3$) и стабильность в циклах (потеря емкости не более $0,0018 \text{ мг/г}$ за цикл). Получен патент РФ № 2850802 на способ получения данного сорбента.

4. Изучен процесс выщелачивания лития из «черной массы» отработанных ЛИА. Оптимизированы условия водного выщелачивания лития из «черной массы» ЛИА с ПАВ (лаурилсульфат натрия, $0,05 \text{ г/г}$) и окислителем (гипохлорит кальция). Установлено, что данная комбинация реагентов повышает суммарное извлечение лития с $41,2\%$ до $71,6\%$ при сохранении высокой селективности перевода лития в раствор (Ni, Co, Mn остаются в твердой фазе). Кинетика процесса описывается моделью Еловича с энергией активации $31,8 \text{ кДж/моль}$.

5. Обоснован выбор сорбционных материалов для ионообменной очистки литиевого концентрата. Установлено, что для удаления кальция и магния из хлоридных литийсодержащих растворов наиболее эффективен хелатный катионит Purolite S950 с аминофосфоновыми функциональными группами, суммарная емкость которого по кальцию и магнию составила $0,70 \text{ моль/дм}^3$, что в 1,6 раза превышает емкость иминодиацетатного катионита Diaion CR11 ($0,44 \text{ моль/дм}^3$). Для удаления бора из литийсодержащих элюатов рекомендованы слабоосновные аниониты Diaion CRB05 с N-метилглюкаминowymi группами (статическая обменная емкость $0,83 \text{ моль/дм}^3$) и отечественный АН-31 (емкость $0,55 \text{ моль/дм}^3$), отличающийся более низкой стоимостью.

6. Разработаны технологические и аппаратные схемы производства карбоната лития: из пластовой воды (с чистотой Li_2CO_3 $99,56\%$, сквозным извлечением 93%) и из «черной массы» ЛИА (с чистотой Li_2CO_3 $95,6\%$, извлечением $71,6\%$).

7. Выбраны коррозионно-устойчивые конструкционные материалы для технологического оборудования. Для агрессивных высокотемпературных сред (горячие концентрированные растворы LiCl , Li_2CO_3) рекомендованы нержавеющие стали AISI 316 и SAF 2507. Испытания подтвердили их высокую стойкость (скорость коррозии составляет $0,0006\text{--}0,007 \text{ мм/год}$, 1–3 группа стойкости), что обеспечивает долговечность аппаратуры.

8. Рассчитаны экономические показатели эффективности проекта получения карбоната лития из первичного сырья (рассол Кембрийского водоносного горизонта) производительностью по рассолу $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ (по карбонату лития 951 т/год). Оценка показала инвестиционную привлекательность переработки пластовых вод: капитальные затраты составили $1,424 \text{ млрд руб.}$, себестоимость $1 \text{ т Li}_2\text{CO}_3$ – 665 тыс. руб. , NPV – $270,8 \text{ млн руб.}$, IRR – $17,6\%$, дисконтированный срок окупаемости – $7,4 \text{ года}$ (при ставке дисконтирования 13%).

9. Результаты диссертационных исследований внедрены в АО «Аксион – Редкие и Драгоценные Металлы» (получен акт о внедрении).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. **Алейников, С.А.** Получение карбоната лития из «черной массы» литий-ионных аккумуляторов / **С.А. Алейников, Н.В. Белоусова** // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2024. – № 3. – С. 34–44.

2. **Алейников, С.А.** Сорбционное извлечение лития из рассола / **С.А. Алейников, Н. В. Белоусова** // iPolytech Journal. – 2025. – Т. 29, № 3. – С. 376–388.

3. **Алейников, С.А.** Изучение кинетики водного выщелачивания лития из «черной массы» литий-ионных аккумуляторов / **С.А. Алейников, Н.В. Белоусова** // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2026. – Т. 32, № 2. – С. 25–34.

4. **Алейников, С.А.** Изучение кинетики сорбции лития сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития / **С.А. Алейников, Н.В. Белоусова** // iPolytech Journal. – 2026. – Т. 30, № 3. – С. 545–558.

Публикация в издании, входящем в международную базу данных Scopus

5. **Алейников, С.А.** Выбор сорбента для очистки литийсодержащих рассолов от ионов кальция и магния / **С.А. Алейников, Н.В. Белоусова, М.Р. Кастюк, Т.С. Неделина** // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. = Journal of Siberian Federal University. Chemistry. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 96–104.

Патенты

6. Пат. № 2837934, Российская Федерация, C01D 15/08; C22B 26/12; C22B 3/24; B01D 15/00; B01D 61/02; F25B 15/16 (2006.01). Способ получения карбоната лития из литийсодержащего раствора и установка для его осуществления / **П.В. Корнев, К.Ю. Кочмарев, С.А. Алейников, М.Р. Кастюк, Т.С. Неделина, Н.Р. Яруллин, А.М. Джумагалиев, И.В. Пономаренко**; заявитель и патентообладатель АО «Аксион Редкие и Драгоценные Металлы»; № заявки 2024118819, заявл. 05.07.2024; опубл. 07.04.2025. Бюл. № 10.

7. Пат. № 2850802, Российская Федерация, B01J 20/30; B01J 20/04; B01J 20/08 (2006.01). Способ получения гранулированного сорбента для извлечения лития из литийсодержащих рассолов / **С.А. Алейников**; заявитель и патентообладатель **С.А. Алейников**; № заявки 2025105965, заявл. 14.03.2025; опубл. 13.11.2025. Бюл. № 32.

Другие публикации

8. **Aleinikov, S.A.** Removal of calcium and magnesium ions from lithium-containing brines / **S.A. Aleinikov** // Проспект Свободный – 2023 : материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Красноярск, 24–29 апреля 2023 г.). – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 93-95.

9. **Алейников, С.А.** Сорбционная очистка литийсодержащих растворов / **С.А. Алейников** // Проспект Свободный – 2023 : материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Красноярск, 24–29 апреля 2023 г.). – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 1644-1646.

10. **Алейников, С.А.** Получение карбоната лития из «черной массы» литий-ионных аккумуляторов / **С.А. Алейников, Н. В. Белоусова** // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств : материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2024 г.). – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. – С. 75-78.

11. **Алейников, С.А.** Сорбция ионов алюминия из щелочных литийсодержащих растворов / **С.А. Алейников** // Проспект Свободный - 2024 : материалы юбилейной XX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 частях (г. Красноярск, 15–20 апреля 2024 г.). – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. – С. 10–13.

12. **Алейников, С.А.** Получение карбоната лития из «черной массы» литий-ионных аккумуляторов / **С.А. Алейников, Н.В. Белоусова** // Цветные металлы и минералы

– 2024 : сборник тезисов докладов двенадцатого международного конгресса (г. Красноярск, 09–13 сентября 2024 г.). – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2024. – С. 989–994.

Подписано в печать 20.10.2026. Формат 60х90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Зак. 106 к

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83