

ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Гакиева Адама Лечиевича
«СОРБЦИЯ РЕНИЯ И ИНДИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМИ
УГЛЕРОДНЫМИ КОМПОЗИТАМИ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности: 2.6.8 Технология редких, рассеянных и радиоактивных
элементов

Актуальность темы обусловлена стратегической важностью рения и индия, потребление которых имеет глобальный устойчивый рост. Рений незаменим в производстве жаропрочных суперсплавов для авиакосмической отрасли и катализаторов риформинга в нефтеперерабатывающей промышленности, а индий в производстве прозрачных проводящих покрытий для жидкокристаллических дисплеев и фотоэлектроники.

Традиционные источники рения – молибденовые и медноколчеданные руды, в которых он присутствует в качестве рассеянного попутного компонента. Однако для отечественных месторождений характерны крайне низкие содержания рения, что делает его попутное извлечение нерентабельным. В этой связи особый интерес представляют нетрадиционные типы сырья, в частности фумарольные эксгаляции вулкана Кудрявый (о. Итуруп), запасы рения в которых поставлены на государственный баланс. Высокотемпературная газовая фаза этого вулкана содержит ценные элементы, включая, наряду с рением, индий, германий, галлий и др. При конденсации фумарольных газов эти элементы переходят в природные термальные воды и конденсат. Технологические растворы, образующиеся при переработке концентратов конденсации фумарольных газов, требуют эффективных методов сорбционного концентрирования.

Существенным ограничением для развития этого направления является отсутствие в Российской Федерации промышленного производства

селективных сорбентов, избирательно извлекающих рений и индий. Используемые зарубежные ионообменные смолы отличаются высокой стоимостью, и поставка их на территорию России затруднена, поэтому целесообразна разработка отечественных сорбционных материалов на основе наномодифицированных активированных углей (углеродных композитов). Подобные материалы обладают более низкой себестоимостью по сравнению с импортными аналогами и могут быть адаптированы для извлечения и концентрирования рения и индия из растворов различного генезиса, включая техногенные растворы переработки индийсодержащих отходов.

На основании вышеизложенного диссертационная работа Гакиева А.Л. на тему «Сорбция рения и индия наномодифицированными углеродными композитами» является своевременной и актуальной.

Научная новизна исследования и полученных результатов.

1. Выявлена зависимость сорбционно-десорбционных характеристик по рению и индию углеродных нанокompозитов (УК) на основе активированных углей ВСК и Татсорб от количества введенных углеродных нанотрубок (УНТ).

2. Установлен эффект снижения положительного заряда поверхности композита Татсорб-УНТ от рН исходного раствора, обеспечивающий возможность одновременной сорбции рения и индия при рН 2, при котором поверхностный заряд УК близок к нулю.

3. Установлен внешнедиффузионный характер сорбции рения и индия композитами ВСК-УНТ и Татсорб-УНТ, модифицированными углеродными нанотрубками. По модели псевдо-второго порядка определены константы скорости этих элементов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Определены режимы сорбционного извлечения рения и индия из растворов наномодифицированными углеродными композитами.

2. Доказана возможность десорбции рения без нагрева с композитов, модифицированных углеродными нанотрубками, в отличие от его высокотемпературной десорбции с активированных углей.

3. Выявлены условия совместной сорбции рения и индия из сернокислых растворов углеродными нанокомпозитами и отдельной их десорбции.

4. Показана возможность извлечения рения углеродными композитами ВСК-УНТ и Татсорб-УНТ из природных вод Молибденового поля, вод озера Теплое, конденсата и растворов концентрата конденсата фумарольных газов вулкана Кудрявый и предложены блок-схемы сорбционного извлечения и разделения рения и индия из конденсата фумарольных газов и его концентрата.

5. Установлена возможность извлечения индия из растворов выщелачивания отходов жидкокристаллических дисплеев со степенью сорбции 57,2 %.

Новизна технического решения по выбору углеродного композита с определенным содержанием углеродных нанотрубок подтверждена выдачей патента РФ № 2802918 с приоритетом от 29 ноября 2022 г.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы из 199 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 26 таблиц и 42 рисунка.

Содержание диссертации и ее завершенность.

Во введении к диссертации представлено аргументированное обоснование актуальности темы с позиций современных потребностей науки и промышленности. Четко сформулированы цель и задачи исследования, изложены положения, выносимые на защиту, а также охарактеризованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе, представляющей собой аналитический обзор литературы, автором проведен детальный анализ современного состояния исследований, посвященных извлечению рения из жидких сред. Установлено, что в настоящее время преимущественное применение в качестве сорбентов находят ионообменные смолы и активированные угли. При этом диссертант

обращает внимание на ограниченность данных об использовании модифицированных углеродных материалов для решения указанной задачи и отмечает отсутствие в Российской Федерации промышленного выпуска сорбентов, селективных к рению. Что касается индия, то доминирующим способом его извлечения в мировой практике остается экстракция.

Во **второй главе** приведено подробное описание характеристик исходных веществ и реагентов, использованных в экспериментальной части работы. Изложены методики проведения аналитических процедур и экспериментальных исследований, а также представлен математический аппарат, применяемый для обработки кинетических зависимостей и равновесных данных процессов сорбции и десорбции.

В третьей главе экономически обоснован выбор компонентов композита для модифицирования активированных углей и приведены результаты экспериментальных исследований получения наномодифицированных углеродных композитов. Исследованы структура синтезированных материалов и заряд поверхности исходных компонентов (активированного угля, углеродных нанотрубок и композита на их основе). Выявлено влияние массовой доли вводимых нанотрубок на сорбционные и десорбционные характеристики по отношению к рению и индию. На основе сопоставительного анализа исходных материалов для синтеза композитов обоснована предпочтительность использования углей марок БАУ и Татсорб.

В четвертой главе рассмотрены закономерности сорбции рения из сернокислых сред. Установлено, что углеродные нанотрубки характеризуются крайне низкой сорбционной активностью по отношению к рению (не превышающей 1,5 %). Показано, что максимальная степень извлечения целевого компонента модифицированными композитами достигается при значении рН среды, равном 2. Определено, что основным мешающим компонентом, оказывающим негативное влияние на процесс, выступают ионы Fe^{3+} . Существенным результатом также является достижение высокой степени десорбции в статических условиях при комнатной температуре: применение

раствора аммиака (8 %) позволило достичь высокой степени десорбции: 98,4 % для композита ВСК-УНТ и 96,3 % для композита Татсорб-УНТ.

В пятой главе приведены результаты исследований по извлечению индия. Установлено, что сорбционная емкость углеродных нанотрубок по индию составляет 77 %. Доказано, что сорбционная способность композита в отношении индия обусловлена присутствием в его составе углеродных нанотрубок, при этом максимальная эффективность извлечения наблюдается при рН, равном 2. Важным практическим результатом является экспериментально подтвержденная стабильность сорбционных характеристик композитов в течение пяти последовательных циклов «сорбция–десорбция», в ходе которых отмечено незначительное снижение их емкости.

Шестая глава посвящена изучению процессов совместного извлечения рения и индия из бинарных модельных растворов. Показано, что изотерма совместной сорбции описывается уравнением Генри. Определены кинетические параметры процесса. Предложена методика последовательного разделения элементов: индий десорбируется раствором соляной кислоты, после чего рений элюируется аммиачным раствором.

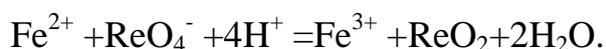
В седьмой главе обобщены результаты апробации разработанного композита Татсорб-УНТ на реальных объектах. Продемонстрирована принципиальная возможность его применения для извлечения рения из природных вод Молибденового поля вулкана Кудрявый, а также для совместного извлечения рения и индия из вод озера Теплое и конденсата фумарольных газов того же вулкана. Подтверждена эффективность использования композита при переработке техногенных отходов электронной промышленности, содержащих индий. В заключительной части главы представлена технологическая схема сорбционного извлечения ценных компонентов из конденсата фумарольных газов.

В заключении сформулированы основные выводы, отражающие результаты диссертационного исследования и рекомендации.

По работе имеются следующие **замечания, уточнения и вопросы:**

1. Целесообразно было в автореферате привести: 1) экономическое обоснование выбора сорбентов (стр.54 диссертационной работы); 2) сравнительный анализ характеристик процесса сорбции рения и индия на ионообменных смолах и разработанных углеродных композитах (стр.117);

2. Не ясно, почему в работе выполнена оценка конкурирующего влияния ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} на сорбцию индия на углеродном композите (стр.90), а для рения только для Fe^{3+} (стр.73). Представляло интерес исследовать влияние продолжительности контакта сорбента на соотношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ в растворе, т.к. существует вероятность восстановления $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ и протекания реакции:



3. При изучении устойчивости работы углеродных композитов в циклах автором исследовано поведение рения и индия. Было ли изучено накопление примесей в композитах? Как это может повлиять в дальнейшем на сорбцию? Возможно ли разделение рения и индия после совместной сорбции в сложнокомпонентных системах?

4. В растворе выщелачивания концентрата конденсации индий сорбируется незначительно (на 8,8 %) из-за присутствия железа. Возможно ли повысить степень сорбции?

Данные замечания носят рекомендательный характер и не снижают достоинств и общей ценности выполненной диссертационной работы, которая выполнена на высоком научном и экспериментальном уровне, а также не влияют на главные научные, теоретические и практические результаты.

Обоснованность научных положений и выводов и достоверность полученных данных базируется на применении комплекса современных методов исследований (фотометрии, титриметрии, сканирующей электронной микроскопии, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, порометрии). Научные положения, выводы и рекомендации в диссертационной работе достоверны.

Практическая значимость работы подтверждается прилагаемым к диссертации актом о проведении испытаний сорбционного извлечения рения из

растворов и концентратов, образующихся на вулкане Кудрявый (о. Итуруп, Сахалинская обл.), выданным ООО «ИВИГ».

Результаты работы могут быть рекомендованы для изучения и внедрения в научных и образовательных организациях, а также на предприятиях Росатома, среди которых АО «ВНИПИПТ», ВИМС им. Н.М. Федоровского, ФГБУ «ИМГРЭ», ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», ФГАОУ ВО НИТУ МИСИС.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы представлены в двух статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных, а также в 11 материалах и тезисах конференций и симпозиумов, в том числе международных.

Диссертация Гакиева Адама Лечиевича на тему «Сорбция рения и индия наномодифицированными углеродными композитами», представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком научном уровне, в которой получены сведения по сорбции рения и индия наномодифицированными углеродными композитами из водных растворов.

Научные положения и выводы, сформулированные автором, не вызывают сомнений. Результаты диссертации оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью. Большая часть результатов отражена в публикациях и апробирована на профильных конференциях.

По своему содержанию диссертационная работа Гакиева Адама Лечиевича соответствует паспорту научной специальности 2.6.8 Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части направлений исследований «Очистка и концентрирование рудных щелоков, газообразных и твердых продуктов разложения рудных концентратов и других видов сырья».

Диссертация Гакиева Адама Лечиевича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные решения задачи сорбционного извлечения рения и индия при комплексной переработке нетрадиционных источников сырья. Реализация этих исследований и разработок способствует значительному вкладу в развитие редкометалльной

отрасли и обеспечение Российской Федерации стратегически важными металлами – рением и индием.

Диссертация Гакиева Адама Лечиевича на тему: «Сорбция рения и индия наномодифицированными углеродными композитами» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Гакиев Адам Лечиевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8 Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Профессор кафедры цветных металлов и золота Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Доктор технических наук, доцент

Богатырева Елена Владимировна

«17» марта 2026

Адрес: 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1;

Телефон: +7(495)647-23-32

Адрес электронной почты: bogatyreva.ev@misis.ru

Подпись Богатыревой Елены Владимировны заверяю
Проректор по безопасности и
общим вопросам НИТУ
МИСИС



И.М. Исаев