



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
Институт физической химии и электрохимии  
им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук  
(ИФХЭ РАН)

Ленинский проспект, 31, корп. 4, Москва, 119071.  
Тел. (495)955-46-01. Факс: (495)952 - 53 - 08. e-mail: dir@phyche.ac.ru http://www.phyche.ac.ru  
ОКПО 02699292, ОГРН 1037739294230, ИНН/КПП 7725046608/772501001

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт физической  
химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина  
Российской академии наук,  
член-корреспондент РАН  
« 22 » 09 2020 г.



**ОТЗЫВ**

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН) о диссертационной работе и автореферате диссертации Вей Мое Аунга на тему «Сорбция рения и скандия из серноокислых растворов активированными углями и углеродными нанокompозитами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

Увеличение объемов производства редких и рассеянных стратегически важных элементов – рения и скандия для традиционного использования, а также разработка на их основе инновационных технологий неразрывно связано с совершенствованием методов их извлечения из минерального сырья и повышением комплексности его переработки.

В настоящее время основное количество рения используется в авиационной и космической технике в виде жаропрочных суперсплавов, нефтепереработке и электронике. Скандий с низкой атомной массой – компонент лигатур алюминиевых сплавов для авиационной отрасли промышленности.

В будущем скандий может найти спрос при создании твердых электролитов для топливных элементов.

Существующие технологии извлечения рения и скандия основаны на их попутном выделении при переработке многокомпонентного сырья. Возвратные растворы уранового производства, в том числе подземного выщелачивания – выбранный соискателем как один из таких объектов, который позволяет извлечь дополнительное количество редких элементов и снизить экологическую нагрузку в зоне его проведения.

В промышленной практике рений из растворов такого состава частично сорбируют анионитом, предназначенном для выделения урана, остальная его часть поступает в оборот. После десорбции урана рений периодически элюируют раствором, содержащим нитрат-ион, и направляют для концентрирования на экстракцию, проводимую в известных условиях.

Отсутствие полноты извлечения рения, значительная стоимость ионита, некоторое снижение его емкостных показателей по урану относятся к основным причинам необходимости совершенствования процесса попутного извлечения рения. Сорбционная технология извлечения скандия с использованием твэков сложного функционального состава, разработанная в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина и прошедшая опытно-промышленную проверку, осложнена потерями функционального компонента, наблюдаемыми при контакте химически не связанного с полимерным носителем экстрагента. В связи с этим тема диссертационной работы Вей Мое Аунга, посвященная разработке сорбционных методов извлечения рения и скандия новыми недорогими в сравнении с промышленными смолами активированными углями и углеродными нанокompозитами применительно к растворам подземного выщелачивания урановых руд, **актуальна**.

Полученные различными производителями активированные угли нового поколения и композиты, содержащие нанокompозитные материалы – углеродные нанотрубки (УНТ), оксид графена и другие создали ту материальную базу, на основе которой диссертант сформулировал **цель работы**, связанную с изучением и сравнительной оценкой сорбционных свойств этих материалов по исследуемым элементам применительно к составу растворов подземного выщелачивания урана.

**Научная новизна** диссертационной работы Вей Мое Аунга выражается в том, что:

- получены равновесные и кинетические характеристики сорбции микроколичеств рения и скандия активированными углями последнего поколения и нанокompозитами на основе различных форм углерода из сернокислых растворов;
- выявлена скоростьопределяющая стадия сорбции этих элементов – диффузия;
- оценкой рассчитанного значения энергии сорбции подтверждено значительное влияние физической адсорбции на поглощение ионов скандия нанокompозитом, содержащим полианилин.

**Практическая значимость** работы существенна:

- найдены режимы сорбционно-десорбционных процессов выделения рения и скандия из сернокисло-хлоридных растворов активированными углями и углеродными нанокompозитами.

– получены параметры сорбции рения и скандия выбранными в работе углем марки ДАС и наномодифицированным УНТ углем (NWC-Z) из технологических возвратных растворов подземного выщелачивания полиметалльных руд Далматовского месторождения (АО «Далур»), подтверждающие возможность попутного извлечения рения и скандия со степенью их извлечения не менее 96,0 % и 21,1 % соответственно.

– представлены блок-схемы сорбционного выделения рения и скандия этими сорбентами.

**Диссертационная работа** Вей Мое Аунга состоит из введения, 5 глав, выводов и списка цитируемой литературы. Она изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 34 таблицы, 77 рисунков. Библиографический список включает 191 ссылку на работу отечественных и зарубежных авторов.

**Во введении** изложена актуальность темы, сформулированы цель и основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая ценность, указан личный вклад автора.

**Первая глава** работы содержит аналитический обзор научно-технической литературы по использованию углеродных сорбентов различного типа для извлечения и концентрирования изучаемых элементов. В конце обзора сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе (методическая часть)** приведены сведения по используемым материалам, описаны основные методы анализов и экспериментов, характеристики задействованных приборов и оборудования.

**В третьей главе** приводятся результаты по исследованию равновесия и кинетики сорбции рения и скандия из модельных серноокислых и серноокисло-хлоридных растворов активированными углями, для производства которых использовано различное сырье. Адсорбция рения в выбранных условиях описывается уравнением Генри, только для угля ДАС – уравнением Ленгмюра. Полученные методом ограниченного объема раствора при различных температурах интегральные кинетические кривые рения и скандия обработаны диссертантом с применением современных кинетических моделей, позволивших наряду с расчетом констант скорости и коэффициентов диффузии, эффективной энергии активации выявить лимитирующую стадию их сорбции – диффузию.

Соискателем удачно подобран элюирующий агент – содовые растворы, использование которых позволяет десорбировать оба элемента, хотя для количественного элюирования рения необходимо значительное увеличение температуры.

На основании результатов комплекса традиционно проводимых при изучении сорбции и десорбции экспериментов, приведенных в этой главе, диссертант остановил свой выбор на активированном угле ДАС с самой большой насыпной плотностью среди изученных материалов, получаемом из доступного каменноугольного сырья – антрацита.

**В четвертой главе** посвящена сорбции рения и скандия новыми углеродными нанокompозитами. Значительное внимание диссертантом уделено изучению структуры наноматериалов. Модифицирование углеродными нанотрубками активированного угля, полученного из скорлупы кокосового ореха, как показали результаты изучения

морфологии композита NWZ-Z, приводит к разупорядочиванию углеродной структуры и увеличению ее дефектности. По сравнению с активированными углями диссертантом показано, что кинетика сорбции на нанокompозите NWZ-Z ухудшилась, хотя емкостные характеристики сравнимы.

Из другой группы наноматериалов – нанокompозитов на основе углеродных нанотрубок, содержащих полиаминокумулен и полианилинполигидрохинон, и оксида графена с введенным в процессе получения полигидрохиноном, более высокую емкость в сравнительных условиях продемонстрировал композит полианилин-углеродные нанотрубки (ПАНИ-УНТ).

С помощью данных сканирующей спектроскопии выявлена его более плотная структура, обусловленная введением углеродных нанотрубок. Хотя полианилин и содержит в составе функциональные группы различного типа, на примере скандия с помощью обработки экспериментальных данных по уравнению Дубинина–Радушкевича диссертантом отмечается большое влияние физической адсорбции в механизм извлечения. Получением и обработкой массива данных по влиянию времени на сорбцию выявлена внешнедиффузионная стадия как скоростьопределяющая.

Корреляция данных по уравнению Еловича может свидетельствовать об энергетической неоднородности активных центров композита ПАНИ-УНТ.

Элюирование рения и скандия с нанокompозита ПАНИ/УНТ растворами выбранного агента – карбоната натрия протекает неэффективно, степень десорбции не превысила 20 %.

В этой же главе проведено сравнение сорбционно-десорбционных характеристик изученных материалов, на основании которого для апробации на технологических растворах автор обоснованно рекомендует угли: активированный уголь ДАС и модифицированный углеродными нанотрубками уголь NWC-Z.

**В главе 5** представлены результаты тестирования этих углей для извлечения рения и скандия из продуктивных сернокислых растворов подземного выщелачивания урановых руд Далматовского месторождения (Курганская область). Хотя текущие концентрации рения и скандия ( $4,95 \cdot 10^{-3}$  и 0,671 мг/л, соответственно) в растворах этого предприятия весьма низкие, достигнутые в выбранных условиях значения степени извлечения элементов из столь сложного многокомпонентного состава (96 и 21,2 % при использовании угля ДАС и 96,2 и 56,0 % – модифицированного углеродными нанотрубками угля NWC-Z) свидетельствуют о высокой эффективности выбранных материалов.

Диссертантом приведена последовательность технологических операций по извлечению рения и скандия из сернокислых растворов подземного выщелачивания урановых руд, до получения товарных продуктов – перрената аммония марки AP-1 и черного концентрата скандия (2 %), которая может быть использована при апробации углей и на других объектах.

В завершении представлены общие выводы по работе, список использованных источников, включающий 191 ссылку.

**Достоверность результатов и обоснованность выводов**, полученных автором, не вызывает сомнений. При выполнении исследований соискатель использовал методы масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой для элементного анализа технологических растворов (масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой iCAP-Qc фирмы Thermo Fisher Scientific, США), ионометрии (рН-метр «SevenEasy pH» компании «Mettler Toledo»), электронной микроскопии для оценки поверхности и структуры нанокompозитов (сканирующий электронный микроскоп марки Neon 40 компании Carl Zeiss, Йена, Германия), спектроскопии комбинационного рассеяния (рамановский спектрометр DXR<sup>TM</sup> Raman microscope компании Thermo Scientific Instruments Group, Waltham, MA, USA).

Определение термостабильности материалов проведены с использованием синхронного термоанализатора STA 449 F3 Jupiter instrument (NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH, Selb, Germany).

При снятии выходных кривых сорбции и десорбции отбор проб осуществляли с помощью универсального коллектора фракций Eldex R (U-200) (США).

Результаты исследований, основные положения и выводы результатов подтверждаются использованием оригинальных методик ведения эксперимента с применением аппаратурной базы, соответствующей современному научному уровню. О достоверности также свидетельствует большой объем экспериментальных результатов, хорошая сходимость данных, полученных с использованием модельных и технологических растворов.

Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

**Автореферат** полностью отражает содержание диссертации.

Основные результаты работы изложены в 16 печатных работах, в том числе 4 статьях в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Они также неоднократно докладывались и обсуждались на международных и российских симпозиумах и конференциях.

После детального ознакомления с материалом диссертации на тему «Сорбция рения и скандия из серноокислых растворов активированными углями и углеродными нанокompозитами», авторефератом и приведенными публикациями автора можно заключить, что результаты, полученные в работе, соответствуют поставленной цели, а содержание автореферата и публикаций соответствуют основному содержанию диссертации и дают полное представление о личном вкладе автора в работу.

Оценивая диссертационную работу Вей Мое Аунга можно констатировать, что она представляет большой практический интерес для научно-исследовательских и проектных организаций, а также занимающихся вопросами комплексной переработки

полиметалльного сырья предприятий, таких как: Акционерное общество «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии», Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара», Акционерное общество «Научно-исследовательский проектный и конструкторский институт горного дела и металлургии цветных металлов», Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт минералогии, геохимии, и кристаллохимии редких элементов», Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н. М. Федоровского», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА-Российский технологический университет», Акционерное общество «Далур», Акционерное общество «Хиагда», Акционерное общество «Атомредметзолото», ООО «Инженерный химико-технологический центр «Русредмет».

Результаты, полученные в диссертационной работе Вей Мое Аунга, по сорбции рения и скандия активированными углями и углеродными нанокompозитами, рекомендуется использовать для создания или усовершенствования технологии попутного сорбционного извлечения рения и скандия при комплексной переработке урансодержащего и другого полиметалльного сырья.

При рассмотрении диссертационной работы возникли следующие **вопросы и замечания**:

1. В технологических растворах подземного выщелачивания урана присутствуют радиоактивные элементы, например, торий. Как его присутствие будет отражаться на емкостных характеристиках изучаемых углеродных сорбентов и качестве получаемых товарных продуктов?
2. Наряду с дорогостоящими редкими элементами – рением и скандием в растворах подземного выщелачивания урана находятся редкоземельные элементы, в основном, цериевой группы, в отличие от изучаемых в значительно больших количествах. Сохранится ли селективность выбранных в работе сорбентов по отношению к скандию?

3. В работе показано, что элюирование рения и скандия с нанокompозита ПАНИ-УНТ растворами карбоната натрия неэффективно, следовало бы исследовать для этой цели и растворы другого состава.
4. Известно, что растворы подземного выщелачивания отличаются низкими температурами. Однако кинетические исследования были ограничены комнатной температурой.
5. В работе не приведена стоимость выбранных сорбентов, а также отсутствует технико-экономическая оценка предлагаемых вариантов извлечения рения и скандия выбранными материалами при комплексной переработке растворов подземного выщелачивания.

Указанные замечания и поставленные вопросы не снижают положительного впечатления от представленной соискателем диссертационной работы.

Диссертация по своему содержанию последовательно раскрывает сущность решаемой проблемы и оформлена в соответствии с требованиями РХТУ им. Д.И. Менделеева. Текст диссертации написан лаконично, стилистически грамотно.

По тематике, методам исследования, научным положениям диссертация Вей Мое Аунга соответствует паспорту специальности научных работников 05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов, в части формулы специальности «Создание и совершенствование технологических схем, ресурсо-, энергосбережение, охрана окружающей природной среды в технологии редких и радиоактивных элементов» и области исследований «Очистка и концентрирование рудных щелоков, газообразных и твердых продуктов разложения рудных концентратов и других видов сырья».

Диссертация Вей Мое Аунга представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи сорбционного извлечения рения и скандия с использованием активированных углей и углеродных нанокompозитов, имеющей существенное значение для продвижения ядерной и редкометалльной отраслей народного хозяйства Российской Федерации.

Представленная диссертация по актуальности, новизне и практической значимости соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (с изменениями и дополнениями) и Положению о порядке присуждения ученых степеней в Российском химико-технологическом университете имени Д.И. Менделеева, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Вей Мое Аунг** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Отзыв рассмотрен и утвержден на *заседании Секции Ученого Совета* *Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук* по химии и технологии радиоактивных элементов, радиоэкологии и радиационной химии (*протокол № 278-3 от 8 сентября 2020 г.*).

Кандидат химических наук,  
профессор НОЦ ИФХЭ РАН,  
заведующий лабораторией химии технеция  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института физической химии и  
электрохимии имени А. Н. Фрумкина  
Российской академии наук (ИФХЭ РАН)

✓  
Герман Константин Эдуардович

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физической  
химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина  
Российской академии наук (ИФХЭ РАН)  
119071 г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4  
Тел.: (495) 955-46-01; E-mail: dir@phychе.ac.ru